

# ANALYSE MULTICRITÈRE DES MESURES DE LUTTE CONTRE L'ÉROSION CÔTIÈRE : DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'AIDE À LA PRISE DE DÉCISION

par

Philippe SAUVÉ

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE  
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DE L'ENVIRONNEMENT  
M. Sc. A.

MONTREAL, LE 15 JANVIER 2017

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Philippe Sauvé, 2017



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

**PRÉSENTATION DU JURY**  
**CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ**  
**PAR UN JURY COMPOSÉ DE :**

M. Mathias Glaus, directeur de mémoire  
Génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Frédéric Monette, président du jury  
Génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Pascal Bernatchez, membre du jury  
Chaire de recherche en géoscience côtière à l'Université du Québec à Rimouski

Mme Marjolaine Castonguay, examinateur externe  
PESCA Environnement

**IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC**

**LE 16 DÉCEMBRE 2016**

**À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE**





## **REMERCIEMENTS**

Mes premiers remerciements vont à mon directeur, Mathias Glaus, pour l'accueil chaleureux alors que j'étais à la recherche d'un programme de maîtrise durant ma dernière année de baccalauréat. Son raisonnement et son soutien ont été un appui conceptuel et moral précieux.

Je remercie l'équipe de PESCA Environnement pour le support financier, humain et matériel. Merci à Marjolaine Castonguay pour l'encouragement à poursuivre mes études à la maîtrise sur un sujet de préoccupation commun, soit l'érosion côtière. Également, merci à Guillaume Beaudet et Sylvain Castonguay pour les nombreux conseils et pour l'accompagnement lors des entretiens consultatifs.

Merci à Pascal Bernatchez et à son équipe du Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières de l'UQAR pour m'avoir fourni les données techniques nécessaires à la modélisation numérique.

J'aimerais souligner le soutien financier du FRQNT, du CRSNG et de PESCA Environnement qui, par l'octroi de la bourse BMP Innovation, m'ont permis de me consacrer entièrement à mon projet.

À Laurie, merci d'être la femme et l'amie dont j'ai besoin au quotidien. À mes parents, merci de m'avoir parlé en septembre 2011 de la blonde du neveu du mari d'une cousine qui a suivi un cours aux Pays-Bas sur un sujet actuel : l'ingénierie côtière. À ma mère, mes tantes et ma copine, merci pour la révision linguistique. À tous mes proches, merci pour l'encouragement constant au cours des deux années de ce cursus de maîtrise.

Merci à tous ceux que ce projet m'a amené à rencontrer. J'ai eu la chance d'avoir des échanges pertinents qui m'ont permis de me faire une idée sur les enjeux individuels et collectifs liés à l'érosion côtière.



# **ANALYSE MULTICRITÈRE DES MESURES DE LUTTE CONTRE L'ÉROSION CÔTIÈRE : DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'AIDE À LA PRISE DE DÉCISION**

Philippe SAUVÉ

## **RÉSUMÉ**

Des solutions d'intervention sont nécessaires afin de protéger les infrastructures qui sont aménagées à proximité des littoraux pour supporter le développement socio-économique des régions maritimes et qui sont menacées par l'érosion côtière. Or, ces solutions d'intervention, implantées dans des systèmes côtiers uniques, présentent des effets et des répercussions spécifiques. De plus, la gestion des zones côtières est complexifiée par les activités socio-économiques qui impliquent une multitude d'acteurs aux intérêts divers.

Au Québec, les rapports d'analyse de solutions en érosion côtière considèrent majoritairement l'aspect technique lié à l'aménagement d'une solution d'intervention et négligent les aspects socio-économique et environnemental. Dans cette situation, des rétroactions potentielles sont délaissées, exposant ainsi le système côtier à des risques. La démarche employée repose sur un volet technique et un volet décisionnel dont la combinaison est démontrée dans le cadre d'une étude de cas.

Le volet technique a été réalisé avec les données de la baie de Plaisance aux Îles-de-la-Madeleine. Dans un premier temps, une caractérisation du système côtier a permis d'obtenir une description du site à l'étude. Sur cette base, une hauteur de vague significative de dimensionnement de 2,28 m pour une période de retour de 30 ans a été calculée. Dans un deuxième temps, les mesures de lutte contre l'érosion côtière (MLCEC) ont été catégorisées sous forme de fiches techniques pour faciliter l'analyse des caractéristiques de chacun d'eux. En s'appuyant sur ces informations, une préconception des MLCEC a permis de sélectionner des MLCEC applicables répondant aux normes d'ingénierie.

Le volet décisionnel a été formalisé avec la méthode d'analyse multicritère AHP. Trois organismes de la Gaspésie (Bonaventure, Comité ZIP Gaspésie et SCFG) consultés ont été utilisés pour comparer leurs priorités en matière de gestion de la zone côtière. Puis, ces priorités ont été employées pour hiérarchiser les MLCEC selon leurs caractéristiques intrinsèques. Finalement, quatre MLCEC ont été retenues, car elles se démarquaient dans le classement des organismes de référence. Les priorités de la ville de Bonaventure et de la SCFG sont similaires avec une priorisation des combinaisons des MLCEC *Enrochement + recharge de plage* (28,2 %) et *Mur de protection + recharge de plage* (28,3 %) respectivement. Le Comité ZIP Gaspésie se distingue en priorisant la recharge de plage (38,1 %). Un classement des MLCEC en fonction d'une estimation du coût est établi et un indicateur d'efficacité est calculé. La MLCEC *Enrochement + recharge de plage* est la solution identifiée par cet indicateur pour la ville de Bonaventure (1,13) et la SCFG (1,12), alors que la recharge de plage est toujours la solution favorisée par le Comité ZIP Gaspésie (1,31). Sur la base de ces trois éléments (AHP, estimation des coûts et indicateur

## VIII

d'efficacité), les décideurs peuvent sélectionner une solution d'intervention en ayant un portrait global de leur milieu.

Cet ouvrage démontre l'utilité d'une démarche globale permettant d'élargir les bases de la prise de décision dans un contexte de sélection d'une MLCEC. La démarche pourrait être améliorée en y intégrant une équipe multidisciplinaire afin d'identifier avec précision les paramètres écologiques, hydrosédimentaires et sociaux influençant la sélection d'une solution d'adaptation des communautés côtières aux aléas côtiers.

**Mots-clés :** érosion côtière, ingénierie côtière, outil d'aide à la décision, AHP, gestion intégrée des zones côtière

# MULTICRITERIA ANALYSIS OF COASTAL PROTECTION MEASURES: DECISION MAKING SUPPORT TOOL DEVELOPMENT

Philippe SAUVÉ

## ABSTRACT

Measures are needed to protect the coastal facilities that are built to support the socio-economic development of maritime regions, and are threatened by coastal erosion. However, every coastal protection measure has specific effects and consequences on coastal systems. Coastal zone management is further complicated by the diversity of interests of a multitude of stakeholders associated with socio-economic activities.

In Quebec, analysis reports on coastal erosion solution focus mainly on the technical aspects, neglecting socio-economic and environmental concerns. In this situation, potential repercussions are ignored, exposing the coastal system to unknown risks. The approach used is demonstrated by a case study, which combines both the technical and the decision-making components.

The technical aspect was developed with data from the baie de Plaisance, Îles-de-la-Madeleine. Firstly, a description of the study site was obtained by the characterization of the coastal system. On this basis, a significant wave height of 2,280 m for a return period of 30 years was calculated. Secondly, based on their technical properties, coastal protection measures were categorized, in order to facilitate the analysis their respective characteristics. Following this exercise, a preliminary evaluation of coastal protection measures allowed the selection of intervention techniques, which were applicable to the study site and met engineering standards.

The decision-making component was formalized using the Analytical Hierarchy Process (AHP), a multi-criteria analysis method. Three organizations from the Gaspé peninsula (Bonaventure, Comité ZIP Gaspésie et SCFG), were consulted. Divergence of interests between the organizations was shown in the weight accorded to the decision making criteria and in the prioritizing of coastal protection measures. In order to reduce differences, two iterations were conducted, requiring a redefinition of coastal protection measures. Following the iterations' process, four intervention scenarios, which stood out in the ranking, were selected. A cost estimate and an efficiency indicator were then calculated to facilitate decision making.

This work demonstrated the usefulness of a global approach, which broadens the basis for the decision making process in coastal zone managing. The approach could be improved by adding multidisciplinary team to identify precisely the ecological, hydrosedimentary and social parameters influencing the selecting of coastal protection measures.

**Key words:** coastal erosion, coastal engineering, decision support tool, AHP, integrated coastal zone management



## TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 ÉTAT DES CONNAISSANCES .....	5
1.1 Zone côtière .....	5
1.1.1 Utilisation et gestion de la zone côtière .....	5
1.1.2 Changements climatiques .....	8
1.1.3 Variations géomorphologiques .....	10
1.2 Mesures de lutte contre l'érosion côtière .....	15
1.2.1 Structure de renforcement .....	16
1.2.2 Structure de stabilisation .....	17
1.2.3 Ouvrage non structural .....	19
1.3 Sélection de mesures de lutte contre l'érosion côtière .....	20
1.3.1 Caractérisation du système côtier .....	21
1.3.2 Présélection des mesures de lutte contre l'érosion côtière .....	26
1.3.3 Aide à la décision .....	27
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE .....	35
2.1 Démarche proposée .....	35
2.2 Processus technique .....	36
2.2.1 Caractérisation du système côtier .....	36
2.2.2 Présélection de mesures de lutte contre l'érosion côtière .....	37
2.2.3 Évaluation de la faisabilité technique des mesures de lutte contre l'érosion côtière .....	38
2.3 Processus décisionnel .....	39
2.3.1 Critères d'aide à la décision .....	39
2.3.2 Hiérarchisation .....	41
2.3.3 Intégration de l'aspect financier .....	43
2.4 Caractéristiques de l'étude de cas .....	44
2.4.1 Processus technique .....	45
2.4.2 Processus décisionnel .....	46
CHAPITRE 3 RÉSULTATS .....	47
3.1 Caractérisation du site à l'étude .....	47
3.1.1 Caractéristiques géomorphologiques .....	47
3.1.2 Caractéristiques techniques du système côtier .....	49
3.2 Conception des mesures de lutte contre l'érosion côtière présélectionnées .....	52
3.2.1 Présélection des mesures de lutte contre l'érosion côtière .....	52
3.2.2 Évaluation de la faisabilité technique .....	52
3.3 Processus d'aide à la sélection des mesures de lutte contre l'érosion côtière .....	55
3.3.1 Critères hiérarchisés d'aide à la décision .....	55
3.3.2 Mesures de lutte contre l'érosion côtière hiérarchisées .....	58

3.3.3	Itérations subséquentes .....	61
3.3.4	Intégration de l'aspect financier.....	67
CHAPITRE 4 DISCUSSION .....		69
4.1	Retombées de la démarche proposée .....	69
4.2	Analyse de la démarche proposée.....	72
4.3	Perspectives et recommandations .....	75
CONCLUSION.....		79
ANNEXE I	FICHES DE CARACTÉRISATION DES MESURES DE LUTTE CONTRE L'ÉROSION CÔTIÈRE.....	81
ANNEXE II	EXPLICATION DE LA MÉTHODE AHP .....	99
ANNEXE III	QUESTIONNAIRE .....	103
ANNEXE IV	MESURES DE LUTTE CONTRE L'ÉROSION CÔTIÈRE HIÉRARCHISÉES PAR LES ORGANISMES.....	105
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		109



## LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 Principaux courants côtiers .....	12
Tableau 1.2 Éléments du bilan sédimentaire potentiellement présents sur le littoral .....	14
Tableau 1.3 Tableau synthèse des enjeux associés à la protection des zones côtières .....	14
Tableau 1.4 Objectifs des catégories des mesures de lutte contre l'érosion côtière .....	15
Tableau 1.5 Rapports d'analyse de mesures de lutte contre l'érosion côtière réalisés au Québec.....	21
Tableau 1.6 Éléments physiques du système côtier nécessaire à la présélection et à la conception des mesures de lutte contre l'érosion côtière.....	22
Tableau 1.7 Comparaison des modules de modélisation numérique du régime de vague à proximité du littoral.....	24
Tableau 1.8 Paramètres physiques généraux à considérer lors de l'évaluation de la faisabilité technique d'une mesure de lutte contre l'érosion côtière.....	27
Tableau 1.9 Description des principes fondamentaux de la qualité totale.....	28
Tableau 1.10 Analyse, selon les principes de la qualité totale, de quatre rapports d'ingénierie traitant de l'étude de solution en érosion côtière réalisés entre 2011 et 2014 .....	29
Tableau 1.11 Caractéristiques des principales méthodes d'analyse multicritère.....	31
Tableau 1.12 Champs d'application des méthodes d'analyse multicritère AHP et ELECTRE .....	31
Tableau 1.13 Échelle de pondération des degrés de priorité de la méthode AHP .....	32
Tableau 2.1 Description des critères d'aide à la décision établis selon les enjeux associés à la protection du littoral .....	40
Tableau 2.2 Organismes consultés avec la firme PESCA Environnement.....	46
Tableau 3.1 Hauteurs de vague significative aux points de calcul près de la côte selon des caractéristiques de vagues au large .....	51
Tableau 3.2 Hauteurs de vague significative de dimensionnement (P1) obtenues avec la distribution de Weibull.....	51

Tableau 3.3	Liste de mesures de lutte contre l'érosion côtière présélectionnées .....	52
Tableau 3.4	Matrice d'évaluation des critères d'aide à la décision de la méthode AHP en fonction des priorités en matière de gestion de la ville de Bonaventure.....	56
Tableau 3.5	Matrices de pondération des mesures de lutte contre l'érosion côtière en fonction des critères d'aide à la décision .....	59
Tableau 3.6	Synthèse des résultats de l'itération initiale de l'analyse multicritère AHP en fonction des priorités en matière de gestion de la zone côtière de la ville de Bonaventure .....	60
Tableau 3.7	Points à améliorer des mesures de lutte contre l'érosion côtière retenues en prévision de la seconde itération .....	62
Tableau 3.8	Liste des mesures de lutte contre l'érosion côtière redéfinies et sélectionnées pour la seconde itération .....	63
Tableau 3.9	Matrice d'évaluation des mesures de lutte contre l'érosion côtière de la deuxième itération selon les critères d'aide à la décision .....	64
Tableau 3.10	Synthèse des résultats de la seconde itération de l'analyse multicritère AHP selon les priorités en matière de gestion de la zone côtière de la ville de Bonaventure .....	65
Tableau 3.11	Classement des MLCEC retenues pour l'étape de sélection d'une solution d'intervention, selon la hiérarchisation des critères d'aide à la décision des trois organismes de référence de la Baie-des-Chaleurs.....	66
Tableau 3.12	Estimation des coûts des mesures de lutte contre l'érosion côtière retenues....	67
Tableau 3.13	Classement des mesures de lutte contre l'érosion côtière en fonction de l'indicateur d'efficience établi avec les coûts médians .....	68
Tableau 4.1	Validation de la démarche proposée avec les principes de la qualité totale ....	74

## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Propriétés physiques relatives à une vague ..... 11
Figure 1.2	Mesures de lutte contre l'érosion côtière incluses dans la catégorie <i>Structure de renforcement</i> a) Mur vertical (béton) – Carleton-sur-Mer, Québec; b) Mur vertical (bois) – Maria, Québec; c) Revêtement (enrobé bitumineux) – Texel, Pays-Bas; d) Revêtement (enrochement) – Carleton-sur-Mer, Québec; e) Revêtement (grillage) – Brouwersdam, Pays-Bas; f) Brise-lame – Stavoren, Pays-Bas ..... 17
Figure 1.3	Mesures de lutte contre l'érosion côtière incluses dans la catégorie <i>Structure de stabilisation</i> a) Brise-lame détaché submergé – Deltares.nl; b) Brise-lame détaché émergé – www.gov.uk; c) Épis maritimes (bois) – Hope Town, Québec; d) Épi-buse (béton) – Luc-sur-Mer, France ..... 18
Figure 1.4	Mesures de lutte contre l'érosion côtière incluses dans la catégorie <i>Ouvrage non structural</i> a) Recharge de plage – Carleton-sur-Mer, Québec; b) riprap (plage en galet) - IDLM, Roche (2011); c) Ganivelle – Shédiac, Nouveau-Brunswick; d) Élyme des sables – Carleton-sur-Mer, Québec; e) Herbiers de zostère, cregim.org ..... 20
Figure 1.5	Modélisation de la bathymétrie ainsi que la localisation des profils de plage et des échantillons granulométriques à Pointe-aux-Loups aux Îles-de-la-Madeleine ..... 22
Figure 1.6	Schéma de la structuration décisionnelle hiérarchique de la procédure d'analyse multicritère AHP ..... 32
Figure 2.1	Schéma de principe de la démarche de sélection proposée ..... 35
Figure 2.2	Schéma explicatif de la procédure de caractérisation du système côtier ..... 36
Figure 2.3	Schéma explicatif de la procédure de présélection des mesures de lutte contre l'érosion côtière ..... 38
Figure 2.4	Schéma explicatif de la procédure d'évaluation de la faisabilité technique des mesures de lutte contre l'érosion côtière ..... 39
Figure 2.5	Schéma explicatif de la procédure de hiérarchisation des critères d'aide à la décision ..... 41

Figure 2.6	Schéma explicatif de la procédure de hiérarchisation des mesures de lutte contre l'érosion côtière par rapport à chacun des critères d'aide à la décision.....	42
Figure 2.7	Schéma explicatif de la procédure de hiérarchisation des mesures de lutte contre l'érosion côtière par rapport à l'objectif global .....	42
Figure 2.8	Schéma explicatif du processus itératif de la démarche proposée .....	43
Figure 2.9	Provenance des données utilisées pour l'étude de cas .....	45
Figure 3.1	Profil de plage typique du site à l'étude .....	48
Figure 3.2	Localisation et bathymétrie de la baie de Plaisance aux Îles-de-la-Madeleine.....	48
Figure 3.3	Position des deux points de calcul utilisés (P1 et P2), position du point de génération des vagues au large et la position des barrières morphologiques du secteur de la baie de Plaisance .....	50
Figure 3.4	Profil des mesures de lutte contre l'érosion côtière à la suite de la conception préliminaire (a) Recharge de plage; (b) Enrochement; (c) Mur de protection; (d) Riprap .....	54
Figure 3.5	Vecteurs de priorités des critères d'aide à la décision représentant les priorités en matière de gestion de la zone côtière de sept municipalités de la Baie-des-Chaleurs en Gaspésie .....	57
Figure 3.6	Vecteurs de priorité accordés aux critères d'aide à la décision par trois organismes de la Baie-des-Chaleurs représentant des intérêts différents .....	57
Figure 3.7	Pourcentages finaux des mesures de lutte contre l'érosion côtière selon les priorités en matière de gestion de la zone côtière de trois organismes de la Baie-des-Chaleurs représentant des priorités différentes .....	61
Figure 3.8	Pourcentages finaux de la seconde itération des mesures de lutte contre l'érosion côtière en fonction des priorités en matière de gestion de la zone côtière de trois organismes de la Baie-des-Chaleurs représentant des priorités différents. ....	66
Figure 4.1	Schéma logique de la démarche proposée pour l'évaluation de mesures de lutte contre l'érosion côtière.....	70

## **LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES**

AHP	Analytic Hierarchy Process
CEM	Coastal Engineering Manual
CIDCO	Centre interdisciplinaire de développement en cartographie des océans
CHL	Coastal Hydraulics Laboratory
DHI	Danish Hydraulics Institute
GISL	Gestion intégrée du Saint-Laurent
IDL	Îles-de-la-Madeleine
LDGIZC	Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières
LiDAR	Light Detection and Ranging
MLCEC	Mesures de lutte contre l'érosion côtière
NMM	Niveau moyen des mers
PASL	Plan d'action Saint-Laurent
OIQ	Ordre des ingénieurs du Québec
SCFG	Société de chemin de fer de la Gaspésie
SHC	Service hydrographique du Canada
TCR	Tables de concertation régionales
UQAR	Université du Québec à Rimouski
USACE	United States Army Corps of Engineers



## INTRODUCTION

Les littoraux, influencés par l'ensemble des processus hydrosédimentaires et géomorphologiques constituant le système côtier, sont naturellement dans un état d'équilibre dynamique précaire (Kasinatha Pandian et al., 2004). Or, les zones côtières sont des milieux de vie attractifs pour la population étant propices aux développements industriels, commerciaux et touristiques. Un développement qui a nécessité historiquement l'aménagement de nombreuses infrastructures côtières. Afin de protéger ces infrastructures côtières face aux facteurs naturels incertains agissant sur les littoraux, des mesures de lutte contre l'érosion côtière (MLCEC) sont construites par les sociétés humaines. Or, cette modification des littoraux ajoute un facteur anthropique aux cycles naturels des systèmes côtiers (Bernatchez et Fraser, 2012). Afin d'éviter des répercussions sur les composantes des systèmes côtiers, les facteurs naturels et anthropiques doivent être considérés lors de la conception des MLCEC. De plus, les changements climatiques exercent une pression supplémentaire sur les systèmes côtiers (Jacob, Lamar et Sawadogo, 2015) accentuant la nécessité de revoir le processus de conception des MLCEC (Tompkins, Few et Brown, 2008).

Les facteurs naturels et anthropiques ainsi que les changements climatiques amènent à aborder la problématique de l'érosion côtière sous trois aspects : environnement, socio-économie et technique. L'aspect environnemental représente les éléments naturels du système côtier : dynamique hydrosédimentaire, géomorphologie côtière et écosystème. L'aspect socio-économique représente les éléments anthropiques de la zone côtière étant influencés par l'évolution du système côtier : milieu social, économie régionale et gestion de la zone côtière. Finalement, l'aspect technique concerne les MLCEC et leurs paramètres de conception. Or, actuellement, l'aspect technique est majoritairement considéré dans les rapports d'analyse de solutions en érosion côtière, laissant peu d'espace aux aspects environnementaux et socio-économiques. Cet état de fait a pour effet de négliger des rétroactions potentielles et d'exposer le système côtier à des conséquences imprévues. Ainsi,

l'application d'un outil d'aide à la prise de décision aux pratiques usuelles en ingénierie côtière permet d'évaluer les MLCEC avec une démarche systémique.

La démarche proposée est destinée aux organisations de professionnels ayant des projets en lien avec l'érosion côtière. Dans un tel contexte, l'utilisation d'un outil d'aide à la prise de décision permet d'améliorer le processus de conception des MLCEC en zone côtière actuel en y intégrant l'opinion des acteurs (Tompkins, Few et Brown, 2008). L'acceptabilité sociale est un enjeu essentiel pour la réussite d'un projet en zone côtière, lieu largement fréquenté par la population. Étant donné que de nombreux acteurs des milieux industriels, commerciaux, récréotouristiques et environnementaux sont présents dans la zone côtière (Forst, 2009), les démarches de gestion sont variées (Félix et al., 2012). Ainsi, le support des acteurs, la simplification des enjeux et l'utilisation d'un processus de décision transparent sont des éléments décisifs pour la réussite d'un projet en zone côtière (Tompkins, Few et Brown, 2008).

L'objectif général du projet vise à développer une démarche d'évaluation des solutions d'intervention en matière de lutte contre l'érosion côtière de façon à diminuer les risques liés à une intervention sur le littoral. Plus spécifiquement, les sous-objectifs de la recherche visent à :

- 1) définir la dynamique du système côtier;
- 2) caractériser les MLCEC applicables;
- 3) développer une liste de critères d'aide à la décision en considérant les aspects techniques, socio-économiques et environnementaux liés à la zone côtière;
- 4) évaluer les MLCEC applicables dans le cadre d'une étude de cas.

Ce projet a été réalisé en partenariat avec la firme PESCA Environnement située à Carleton-sur-Mer, en Gaspésie. La réalisation de l'étude de cas a été effectuée dans la région du Québec maritime, afin d'analyser la problématique de l'érosion côtière dans un marché à proximité de l'entreprise partenaire. Ce territoire couvre les régions du Bas-Saint-Laurent, de la Côte-Nord, de la Gaspésie, des Îles-de-la-Madeleine et d'une partie de Chaudière-Appalache et de la Capitale-Nationale (Boyer-Villemare et al., 2015). Historiquement, le Québec maritime s'est développé par les rives du fleuve Saint-Laurent. Aujourd'hui, un



réseau routier, reliant les municipalités riveraines, ceinture cette artère maritime. En 2014, le Québec maritime comptait une population de 407 000 habitants, concentrée sur une bande riveraine longue d'environ 3 600 km (Boyer-Villemare et al., 2015).

Cette région a fait l'objet d'études traitant de la gestion de la zone côtière :

- Morneau et al. (2001) ont publié un rapport évoquant la complexité du système de gestion de la zone côtière et soulevant la nécessité d'employer « un outil qui permet d'établir un cadre d'analyse des enjeux environnementaux ainsi qu'un mécanisme de concertation des populations riveraines et des divers utilisateurs ».
- Savard et Bourque (2010) ont dressé le portrait du processus décisionnel de l'adaptation aux changements climatiques dans les zones côtières du Québec maritime. Ils soulevaient que « la science est loin d'être le principal facteur influençant une décision ».
- Chouinard et al. (2011) soulignaient l'urgence de trouver des démarches de gestions alternatives pour mettre un frein à l'érosion constante des zones côtières.

Également, en 2012, le gouvernement du Québec a établi un cadre de référence à l'intention des Tables de concertation régionales destinée à assurer une gestion intégrée du Saint-Laurent.

En considérant que l'équilibre dynamique des systèmes côtiers est affecté par l'accentuation de l'érosion côtière, par l'urbanisation grandissante de la zone côtière ainsi que par l'état actuel de la situation en matière de gestion des zones côtières et d'ingénierie côtière, ce mémoire propose une nouvelle démarche de conception de MLCEC basée sur une démarche systémique.

Le présent document est subdivisé en quatre chapitres principaux qui présentent l'état des connaissances, la méthodologie, les résultats et la discussion. Le premier chapitre aborde l'état des connaissances lié aux enjeux engendrés par la problématique de l'érosion côtière. Le second chapitre explique le cheminement méthodologique pour le développement de la démarche proposée. Le troisième chapitre présente les résultats d'une étude de cas réalisée en

Gaspésie et aux Îles-de-la-Madeleine. Une analyse de la démarche proposée est développée dans le dernier chapitre.

## **CHAPITRE 1**

### **ÉTAT DES CONNAISSANCES**

Ce chapitre présente l'état des connaissances liées au sujet d'étude et est divisé en trois sections. La première section présente les enjeux environnementaux, sociaux et économiques de la problématique d'érosion pour les zones côtières. La seconde section regroupe les mesures de lutte contre l'érosion côtière et présente leurs effets distincts sur la zone côtière. La dernière section présente des outils employés dans les domaines de l'ingénierie côtière et de la gestion environnementale.

#### **1.1 Zone côtière**

Les zones côtières, lieu de rencontre entre la terre et la mer (Dalcourt et al., 2002), sont des régions densément peuplées à l'échelle planétaire et propices à un développement économique important. Or, ces régions sont exposées à l'équilibre dynamique précaire du système côtier. Cet équilibre dynamique est régi par des processus d'origine climatique, hydrique et sédimentaire qui sont influencés par les changements climatiques et les modifications anthropiques du littoral. Les modifications induites par les activités humaines (de manière directe ou indirecte) engendrent des effets sur l'équilibre dynamique du littoral et potentiellement des impacts négatifs sur des composantes environnementales et/ou socio-économiques. Une gestion des zones côtières judicieuse est primordiale afin de limiter les impacts sur les aspects environnementaux, socio-économiques et techniques et d'assurer une adaptation des territoires aux changements climatiques.

##### **1.1.1 Utilisation et gestion de la zone côtière**

Les zones côtières du Québec maritime sont d'abord un milieu de vie pour de nombreuses familles, alors qu'on y dénombre 4848 bâtiments résidentiels (Bernatchez et al., 2015). Les zones côtières présentent également de nombreux attraits pour le développement d'activités industrielles, commerciales et récréotouristiques, traditionnelles et culturelles, qui sont

maintenant majeures pour l'économie (Dalcourt et al., 2002). Pour soutenir ces activités, de nombreuses infrastructures, telles que des bâtiments (578 unités), des routes et des voies ferrées (320 km) (Bernatchez et al., 2015) ont été construites dans la zone côtière au fil des années. Sur le plan socio-économique, les routes nationales et les voies ferrées occupent une place prépondérante pour le développement régional. Aussi, en raison de la qualité du paysage qu'elle traverse, la vocation touristique de ces liens de transports est l'assise d'un secteur économique majeur pour ces régions (Morneau et al., 2001). Ainsi, le tourisme, couplé généralement au désenclavement des régions, amène une diversification et un accroissement des activités en zone côtière (Dalcourt et al., 2002).

En 1987, au Québec, l'abrogation d'une loi restreignant l'accès public au bord de mer dans une bande riveraine de 60 mètres (Lagueux et Côté, 1995) a mené à une densification de l'occupation du littoral. Or, l'accroissement du nombre d'utilisateurs est en corrélation avec l'augmentation des perturbations des écosystèmes côtiers. En effet, le développement de diverses activités côtières a engendré des modifications aux composantes physiques des écosystèmes côtiers (Dalcourt et al., 2002). L'aménagement d'infrastructures côtières et de mesures de lutte contre l'érosion côtière (MLCEC) a eu pour effet de perturber la dynamique hydrosédimentaire, entraînant la modification et la perte d'habitats naturels (Zanuttigh et al., 2005) et affectant la diversité et l'abondance des espèces benthiques (Bertasi et al., 2007). De plus, les écosystèmes côtiers qui migrent vers les terres afin de s'ajuster à la hausse du niveau de la mer, font maintenant partie des écosystèmes les plus à risques face aux changements climatiques en raison de contrainte naturelle (falaises) ou artificielle (routes, structures de protection) bloquant cette migration naturelle (Bernatchez et Quintin, 2016).

Entre les années 1980 et le début des années 2000, à la suite de tempêtes majeures, une concentration des efforts gouvernementaux québécois en réaction aux aléas climatiques laisse peu de ressources pour la prévention des risques. Durant cette période, l'aménagement de MLCEC s'est effectué en situation d'urgence afin de protéger les infrastructures côtières (Bernatchez et Fraser, 2012; Boyer-Villemare et al., 2015). Les enjeux individuels (conservation de l'intégrité des infrastructures côtières par les propriétaires, municipalités et

ministères) ont été à la base du financement des mesures de lutte contre l'érosion côtière mettant de côté la dynamique naturelle des systèmes côtiers et la prise de décision collective (Boyer-Villemare et al., 2015). Également, l'aménagement d'un grand nombre de MLCEC entraîne un faux sentiment de sécurité dans les populations côtière. Alors que la prolifération des MLCEC devrait démontrer l'intensification de l'érosion côtière, elle est plutôt perçue comme étant une maîtrise de l'environnement côtier (Drejza, Bernatchez et Dugas, 2011). Or, ce mode de gestion de la zone côtière provoque une rétroaction positive (amplification des effets) du processus d'érosion côtière. L'omission d'analyser l'impact d'une MLCEC sur la dynamique hydrosédimentaire a pour effet d'accentuer l'érosion côtière par une artificialisation du littoral, sans traiter les causes réelles qui y sont liées (Jolicoeur et O'Carroll, 2007).

En 2001, environ 38,3 % de la population canadienne résidait à moins de 20 km d'un littoral océanique ou d'une berge des Grands Lacs (Manson, 2005). Dans le Québec maritime, entre 2015 et 2065, 1,5 milliard de dollars en bâtiments, terrains et infrastructures routières seront affectés par l'érosion côtière si le statu quo est conservé (Bernatchez et al., 2015). Dans l'état actuel, c'est 5426 bâtiments résidentiels, industriels, de services et commerciaux, en plus de 295 km de route et de 26 km de voies ferrées qui seront touchés par l'érosion côtière dans le Québec maritime (Bernatchez et al., 2015). Avec de tels chiffres, les plans d'action gouvernementaux québécois et canadiens ont été ajustés afin de mener des actions avec une perspective systémique et moins encline à la variabilité politique (Boyer-Villemare et al., 2015). Une saine gestion de la zone côtière se veut primordiale afin de coordonner les activités économiques qui y ont lieu. Ces activités impliquent la présence d'acteurs aux intérêts divers complexifiant la gestion de ces zones côtières dont les écosystèmes sensibles sont spécialement vulnérables aux choix de gestion. Ainsi, dans le cadre du Plan d'action Saint-Laurent (PASL) 2011-2026, la gestion intégrée du Saint-Laurent (GISL) est mise en œuvre. Cette démarche de gestion est définie dans le PASL 2011-2026 comme étant « un processus permanent basé sur la concertation de l'ensemble des décideurs et des usagers de la société civile pour une planification et une meilleure harmonisation des mesures de protection et d'utilisation des ressources de cet important écosystème, et ce, dans une optique

de développement durable ». Les éléments de la GISL sont concrétisés par la mise sur pied de 12 tables de concertation régionales (TCR) dont la mission est de favoriser la concertation des acteurs régionaux concernés par les enjeux liés à la zone côtière afin de représenter les préoccupations et la volonté d'action du milieu.

Les diverses activités économiques de la zone côtière sont aujourd'hui vulnérables aux conséquences des changements climatiques, soit la submersion, l'érosion côtière et les aléas climatiques (Jacob, Lamar et Sawadogo, 2015). Une gestion appropriée de la zone côtière doit tenir compte d'une adaptation des régions littorales aux changements climatiques afin de définir les limites de l'utilisation anthropique des littoraux (Jacob, Lamar et Sawadogo, 2015).

### **1.1.2 Changements climatiques**

Les changements climatiques sont la résultante de la détérioration de la composition de l'atmosphère mondiale et viennent s'additionner à la variation naturelle du climat (GIEC, 2014). La hausse des températures à l'échelle planétaire perturbe particulièrement les systèmes côtiers en raison de son influence sur le niveau moyen de la mer, sur la fréquence et l'intensité des tempêtes ainsi que sur la présence d'amas de glace (Wong et al., 2014).

L'augmentation du niveau moyen de la mer (NMM) est observée depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle, période durant laquelle la tendance du niveau moyen des mers à l'échelle mondiale s'est élevé de  $1,7 \pm 0,2$  mm/an entre 1900 et 2009 (Church et White, 2011). Aujourd'hui, les projections de hausse du niveau marin présentent de grandes incertitudes qui sont fonction des scénarios de réchauffement climatique. Les scénarios les plus optimistes limitant le réchauffement moyen à 2°C prévoient une hausse du niveau marin se situant entre 0,4 et 0,6 m d'ici 2100. Les scénarios les plus pessimistes prédisant un réchauffement moyen de 4,5 °C prévoient une hausse du niveau marin se situant entre 0,7 et 1,2 m d'ici 2100. Ce phénomène est expliqué par la fonte des glaciers et par l'expansion thermique des océans (Daniel, 2001).

Les tempêtes engendrent de forts vents ainsi qu'une baisse de la pression atmosphérique qui influent sur la dynamique hydrosédimentaire. Alors que les vents produisent de grandes vagues, la baisse de la pression atmosphérique provoque une surcote du niveau d'eau (Savard et al., 2008). Dans le golfe du Saint-Laurent, une augmentation a été remarquée quant à la fréquence d'observations des surcotes entre la première et la deuxième moitié du XX<sup>e</sup> siècle (Savard et al., 2008). Lorsqu'une tempête coïncide avec d'autres conditions telles que de fortes marées et l'absence de glaces, son impact sur les zones côtières est amplifié (Bernatchez et M. Dubois, 2004). Dès lors, l'augmentation du NMM et de la fréquence des tempêtes accroît la vulnérabilité des zones côtières en augmentant les risques de dommage aux infrastructures côtières par l'érosion et la submersion (Daigle et al., 2006).

De 30 à 40 % des tempêtes annuelles surviennent en période hivernale (Savard et al., 2008). La présence d'un couvert de glace offre donc une protection naturelle au littoral en atténuant l'impact des vagues durant cette période (Senneville et al., 2014). Or, le couvert de glace de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent est menacé par le réchauffement climatique. La décroissance de la glace côtière a pour effet d'accentuer le temps d'exposition du littoral aux agents hydrodynamiques et, ainsi, d'augmenter les risques d'érosion et de submersion (Senneville et al., 2014). Un hiver doux retarde la formation du couvert de glace, provoque son départ prématuré, augmente sa mobilité et provoque de grandes ouvertures dépourvues de glace pouvant atteindre plusieurs dizaines de kilomètres de largeur. La présence d'une couverture de glace de mer dans le golfe du Saint-Laurent à un taux supérieur à 30 % permet d'amoindrir l'émergence des vagues (Savard et al., 2008). Or, la durée de cet effet est passée d'une durée moyenne de 80 jours entre 1960 et 1995 à une durée moyenne de 55 jours entre 1996 et 2007 (Savard et al., 2008). Il est donc prévu que la réduction du couvert de glace devrait engendrer une augmentation de 5 à 10 % des hauteurs de vagues significatives extrêmes dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent (Ruest, 2014). De plus, une diminution de 67 % de la concentration maximale annuelle du régime de glace depuis 1981 est à prévoir d'ici 2055 (Senneville et al., 2014). En l'absence de glace sur le bas estran, le pied de glace du haut estran forme un mur vertical sur la rive permettant une amplification de l'effet de

réflexion des vagues sur la paroi verticale favorisant l'érosion du bas de plage (Bernatchez et M. Dubois, 2004).

### **1.1.3 Variations géomorphologiques**

L'équilibre dynamique dans lequel les systèmes côtiers évoluent est naturellement précaire, car il est influencé par des agents climatiques difficilement prévisibles. Ces phénomènes sont la source motrice de la dynamique hydrosédimentaire, responsables des variations géomorphologiques propres à chacun des littoraux (Benedet et al., 2004). La compréhension des variations géomorphologiques est nécessaire afin de permettre une conception des mesures de lutte contre l'érosion côtière (MLCEC) adaptées aux processus côtiers du littoral étudié. Les vagues, les courants côtiers et les marées sont les principaux processus naturels ayant une influence majeure sur la dynamique hydrosédimentaire d'un système côtier (Pilkey et al., 2011).

#### **Vagues**

Les vagues représentent la force centrale dans la variation géomorphologique des littoraux (Pilkey et al., 2011). Le gabarit des vagues varie en fonction des caractéristiques du vent, de la profondeur d'eau ainsi que par divers phénomènes de modification et de transformation (McCormick, 2010). La vitesse, l'orientation, la durée et le fetch du vent influent sur la surface de l'eau en y transmettant de l'énergie modifiant ainsi les propriétés des vagues (figure 1.1). Toutefois, l'accroissement des vagues n'est pas infini. En eau profonde, le déplacement de la surface libre atteint son développement maximal lorsque l'énergie transmise à l'eau est dissipée par le déferlement. Aussi, le comportement et les propriétés des vagues sont modifiés par divers phénomènes lorsqu'elles se propagent d'une zone d'eau profonde vers la côte (CERC, 2006).

Les vagues générées en eau profonde sont dirigées vers le littoral par transmission de l'énergie. Plusieurs phénomènes de transformation influencent les caractéristiques des vagues en fonction de la profondeur, de la bathymétrie et des obstacles physiques (McCormick, 2010). D'abord, la direction de la vague est influencée lors de sa propagation par l'effet du



fond marin, la réfraction et la diffraction qui provoquent une concentration ou une dispersion de l'énergie. Ensuite, la dissipation retire de l'énergie aux vagues par la friction, la percolation, le déferlement et la réflexion, en fonction de certaines configurations géomorphologiques. Puis, l'augmentation de l'énergie des vagues est provoquée par la réflexion, le vent et l'interaction avec les courants (CERC, 2006; Holthuijsen, 2007; Kelley, Ramsey et Byrnes, 2004; McCormick, 2010). Les phénomènes de transmission de l'énergie des vagues ont pour effet de mettre en suspension les sédiments, puis de causer divers types de courants côtiers (Bourgou et Miossec, 2010).

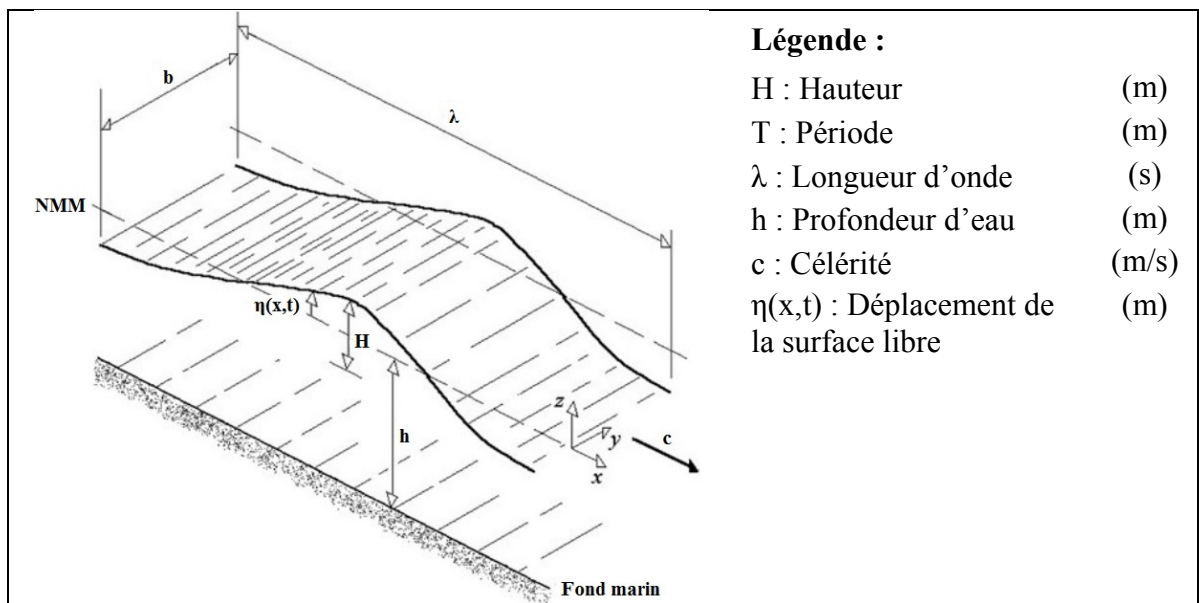


Figure 1.1 Propriétés physiques relatives à une vague  
Adaptée de : McCormick (2010)

### Courants côtiers

Les courants côtiers, présents sur une distance se chiffrant à quelques centaines de mètres du littoral (Bourgou et Miossec, 2010), contribuent également à la variation géomorphologique des zones côtières (Drejza, Friesinger et Bernatchez, 2014). Ils sont générés par la houle, le déferlement des vagues, le vent et la marée. Leur évolution est liée à la bathymétrie (Bourgou et Miossec, 2010). Les courants côtiers sont divisés en deux catégories : la dérive littorale et les courants de reflux (tableau 1.1). Le terme *dérive littorale* est utilisé pour désigner à la fois

l'ensemble des processus hydriques responsables du transport sédimentaire parallèle à la côte et le type de courant provoqué par la houle oblique (Drejza, Friesinger et Bernatchez, 2014).

Tableau 1.1 Principaux courants côtiers  
Tiré de Bourgou et Miossec (2010); Drejza, Friesinger et Bernatchez (2014); SDAGE (2005)

	Courants	Processus hydriques	Effets morphologiques
<b>Dérive littorale</b>	Dérive littorale	• Houle oblique	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transport sédimentaire parallèle au rivage</li> <li>• Phénomènes d'érosion et d'accrétion</li> </ul>
	Courant de marée	• Flot et jusant dans des passages étroits	
	Courant estuarien	• Débit de cours d'eau	
<b>Courants de reflux</b>	Courant d'entraînement	• Déferlement des vagues	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transport sédimentaire vers le large</li> <li>• Effet sur le fond marin</li> <li>• Roulement des sédiments</li> </ul>
	Courant d'arrachement	• Reflux du déferlement des vagues concentré dans un couloir	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transport sédimentaire vers le large sur l'entièreté de la profondeur d'eau</li> </ul>

### Dynamique hydrosédimentaire

En plus de la dérive littorale, un déplacement sédimentaire se produit dans le profil transversal du littoral provoquant une fluctuation de la position du trait de côte, aux alentours d'une position de tendance, pouvant être saisonnière, annuelle ou décennale (Van Rijn, 2011). Le trait de côte est la limite entre la terre et la mer. Drejza, Friesinger et Bernatchez (2014) le définissent comme étant la « limite de la zone d'influence des processus côtiers » correspondant au « sommet du talus côtier » ou au « sommet d'une structure rigide ». Cette fluctuation temporelle est le comportement morphologique le plus fréquent, observable entre la distinction des profils automnal et estival (Van Rijn, 2011). L'érosion se produit en période automnale et l'accrétion engraisse les rives en période estivale (Kasinatha Pandian et al., 2004; Kelley, Ramsey et Byrnes, 2004; Morneau et al., 2001). Cet équilibre dynamique est précaire et peut facilement être bouleversé par les changements climatiques et les actions anthropiques (Heerhartz et al., 2014). Les changements climatiques ont pour effet d'accentuer les facteurs d'érosion, tels que les vagues, les tempêtes, les marées, les courants, les glaces, le vent, le processus cryogénique et les précipitations intenses (Savard et al.,

2008), alors que les actions anthropiques, telles que l'aménagement progressif de MLCEC et d'obstacles à la circulation des sédiments littoraux ainsi que l'excavation et le prélèvement de matériaux sur le littoral, ont une influence sur la dynamique sédimentaire (Bernatchez et M. Dubois, 2004). Conséquemment, un dérèglement de la position tendanciel du trait de côte survient; l'érosion est plus importante que l'accrétion et un recul de la position du trait de côte est enregistré (Berry, Fahey et Meyers, 2014; Van Rijn, 2011). Le terme *taux d'érosion* est employé pour désigner la vitesse de recul du trait de côte. Le taux d'érosion varie en fonction de la morphologie, de la stratigraphie et des processus côtiers d'une région (Bernatchez et al., 2015). Par exemple, le taux d'érosion moyen pour le Québec maritime est de 0,55 m/an (Drejza, Friesinger et Bernatchez, 2015).

L'analyse d'une problématique d'érosion côtière passe par une compréhension de l'interaction entre les processus sédimentaires et hydriques. Une approche par unité hydrosédimentaire permet de cerner les éléments de la dynamique hydrosédimentaire (Anfuso et Gracia, 2005) et d'adapter la conception d'une MLCEC en fonction de ces éléments (Kim, 2010). Une unité hydrosédimentaire est définie comme étant un secteur de côte délimité par des éléments morphologiques infranchissables, naturels ou anthropiques (Anfuso et Gracia, 2005; Drejza, Friesinger et Bernatchez, 2014). Les processus côtiers se déroulent entièrement dans une unité hydrosédimentaire (Van Rijn, 2011) et toutes modifications à ceux-ci demeurent sans conséquence pour les unités hydrosédimentaires adjacentes (Drejza, Friesinger et Bernatchez, 2014). Les unités hydrosédimentaires peuvent se diviser en plusieurs cellules ayant un fonctionnement autonome, mais pouvant parfois, en fonction des processus côtiers, échanger des sédiments avec les cellules adjacentes (Charlier, Chaineux et Morcos, 2005; Drejza, Friesinger et Bernatchez, 2014). Une unité hydrosédimentaire contient un volume sédimentaire approximativement stable, dont les variations se mesurent en évaluant le bilan sédimentaire. Le bilan sédimentaire est l'étude des sources, des pertes et des réserves sédimentaires du littoral (tableau 1.2) (SDAGE, 2005). Les impacts potentiels d'une MLCEC sur la dynamique sédimentaire doivent donc être considérés lors du processus de conception afin de ne pas mener à un bilan sédimentaire négatif (Airoldi et al., 2005).

Tableau 1.2 Éléments du bilan sédimentaire potentiellement présents sur le littoral

Sources	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rivières et estuaire</li> <li>• Érosion des falaises et des dunes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Apports du large</li> <li>• Dépôts organiques</li> </ul>
Pertes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prélèvements anthropiques</li> <li>• Fuites vers le large</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vents marins</li> </ul>
Réserves	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deltas sous-marins</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Matériaux littoraux</li> </ul>

**Tableau synthèse des enjeux**

En synthèse, le tableau 1.3 présente les enjeux associés à la protection des zones côtières à considérer dans le processus de conception d'une mesure de lutte contre l'érosion côtière. Ces enjeux sont tirés d'une analyse critique de la littérature scientifique employée pour le développement du présent chapitre.

Tableau 1.3 Tableau synthèse des enjeux associés à la protection des zones côtières

Enjeux associés à la protection des zones côtières		Références
Environnementaux	Modification des processus littoraux	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bernatchez et Fraser (2012)</li> <li>• Jolicoeur et O'Carroll (2007)</li> </ul>
	Perturbations environnementales temporaires	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bird et Lewis (2015)</li> <li>• Seymour et al. (1995)</li> </ul>
	Changements environnementaux permanents	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Leclerc (2010)</li> <li>• Bertasi et al. (2007)</li> </ul>
Socio-économiques	Intégration au paysage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dalcourt et al. (2002)</li> <li>• Johnston, Slovinsky et Yates (2014)</li> <li>• Morneau et al. (2001)</li> </ul>
	Modifications aux activités d'économie locale	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bernatchez et al. (2015)</li> <li>• Bernatchez et M. Dubois (2004)</li> <li>• Dalcourt et al. (2002)</li> <li>• Morneau et al. (2001)</li> </ul>
	Effets sur la pratique de loisirs	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Garmendia et al. (2010)</li> <li>• Morneau et al. (2001)</li> </ul>
Techniques	Protection des infrastructures	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CERC (2006)</li> </ul>
	Fiabilité structurale	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CERC (2006)</li> </ul>
	Effets des changements climatiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Savard et al. (2008)</li> <li>• Daigle et al. (2006)</li> <li>• Daniel (2001)</li> <li>• Senneville et al. (2014)</li> </ul>

## 1.2 Mesures de lutte contre l'érosion côtière

La lutte contre l'érosion côtière est un problème pour les sociétés humaines. Des vestiges de mesures de lutte contre l'érosion côtière (MLCEC) datant du III<sup>e</sup> siècle avant notre ère ont été découverts en Égypte (Charlier, Chaineux et Morcos, 2005). L'évolution de la lutte contre l'érosion côtière a été lente (Charlier, Chaineux et Morcos, 2005), le défi étant de protéger des infrastructures côtières statiques face à la mobilité inhérente du littoral. Durant le XX<sup>e</sup> siècle, les chercheurs ont développé des équations empiriques (Sverdrup et Munk, 1947) et effectué des études sur la dynamique hydrosédimentaire permettant des changements notables dans le domaine de la conception de MLCEC (Kim, 2010).

La littérature traite de plusieurs types de MLCEC sous deux catégories : les *hard structures* et les *soft structures* (Van Rijn, 2011). Dans ce mémoire, la catégorie *hard structures* est scindée en deux catégories, soit *Structure de renforcement* et *Structure de stabilisation*. Le terme *soft structures* est traduit par *Ouvrages non structuraux*. De cette façon, les termes utilisés font référence aux effets et aux répercussions des MLCEC sur la dynamique hydrosédimentaire. Le tableau 1.4 présente les MLCEC et les fonctions de chacune des catégories. Les MLCEC incluses dans chacune des catégories présentent des effets et des répercussions spécifiques. Des fiches de caractéristiques propres aux principales MLCEC répertoriées dans la littérature sont présentées à l'annexe I.

Tableau 1.4 Objectifs des catégories des mesures de lutte contre l'érosion côtière

Catégories	Objectifs	Mesures de lutte contre l'érosion côtière
Structure de renforcement ( <i>hard structure</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arrêter le recul du trait de côte.</li> <li>• Protéger les infrastructures côtières.</li> <li>• Stabiliser les talus côtier.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mur de protection</li> <li>• Revêtement</li> <li>• Brise-lame</li> </ul>
Structure de stabilisation ( <i>hard structure</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stabiliser les processus hydrosédimentaires.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Épi maritime</li> <li>• Brise-lame détaché</li> </ul>
Ouvrage non structural ( <i>soft structure</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Réaménager les littoraux.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recharge de plage</li> <li>• Riprap</li> <li>• Gestion des dunes</li> <li>• Végétation</li> </ul>

### 1.2.1 Structure de renforcement

Les premières mentions de l'utilisation de structures de renforcement remontent au X<sup>e</sup> siècle alors que les Néerlandais ont été les premiers en Occident à protéger leurs infrastructures côtières avec des monticules (Charlier, Chaîneux et Morcos, 2005; Hanson et al., 2002). Depuis cette époque, les structures de renforcement (figure 1.2) sont employées avec l'objectif de protéger les infrastructures côtières menacées par le recul du trait de côte (Charlier, Chaîneux et Morcos, 2005). L'effet des structures de renforcement est le maintien d'une position fixe du trait de côte ainsi que la protection de la zone côtière face à la submersion (Kraus et McDougal, 1996). Les répercussions sur le système côtier de ce type de structures sont la réduction des réserves sédimentaires ainsi que l'augmentation de phénomènes physiques tels que la réflexion, la réfraction et la diffraction.

Les structures de renforcement réduisent l'accès aux réserves sédimentaires disponibles, engendrant un bilan sédimentaire déficitaire de l'unité hydrosédimentaire. Selon Bernatchez et Fraser (2012), les côtes dénaturées par une structure de renforcement sont entre deux et cinq fois moins larges que les côtes naturelles du même type. Ce fait est expliqué par l'augmentation de la réflexion des vagues sur le littoral qui engendre une tendance à la disparition du haut estran (Bernatchez et Fraser, 2012). Or, cette section de l'écosystème côtier est primordiale pour le maintien du bas estran naturel, environnement fertile pour le milieu biotique (Leclerc, 2010).

La réfraction et la diffraction des vagues sur la structure provoquent également un phénomène nommé *Effet de bout* (Basco, 2006; CERC, 2006). La répercussion de ce phénomène est de créer une indentation arquée aux extrémités de la structure de renforcement et, conséquemment, à une aggravation de l'érosion à cet endroit (Kraus et McDougal, 1996).



Figure 1.2 Mesures de lutte contre l'érosion côtière incluses dans la catégorie *Structure de renforcement* a) Mur vertical (béton) – Carleton-sur-Mer, Québec; b) Mur vertical (bois) – Maria, Québec; c) Revêtement (enrobé bitumineux) – Texel, Pays-Bas; d) Revêtement (enrochement) – Carleton-sur-Mer, Québec; e) Revêtement (grillage) – Brouwersdam, Pays-Bas; f) Brise-lame – Stavoren, Pays-Bas

### 1.2.2 Structure de stabilisation

L'utilisation des structures de stabilisation a commencé au XIV<sup>e</sup> siècle alors que les Britanniques, les danois et les Nord-Américains ont aménagé des épis maritimes. Les épis maritimes ont été largement utilisés depuis ce temps et l'effet positif de cette mesures de lutte



contre l'érosion côtière (MLCEC) est encore controversé (Charlier, Chaineux et Morcos, 2005). Les structures de stabilisation (figure 1.3) sont employées dans le but de modifier la dynamique d'une unité hydrosédimentaire en la compartimentant en plusieurs cellules hydrosédimentaires (Van Rijn, 2011). Les structures de stabilisation assurent ainsi la protection des infrastructures côtières en provoquant un ajustement de la dynamique hydrosédimentaire afin de favoriser la sédimentation aux endroits déterminés (Bertasi et al., 2007; Birben et al., 2007; CERC, 2006). Toutefois, ce type de structure peut déséquilibrer le bilan d'une unité hydrosédimentaire.

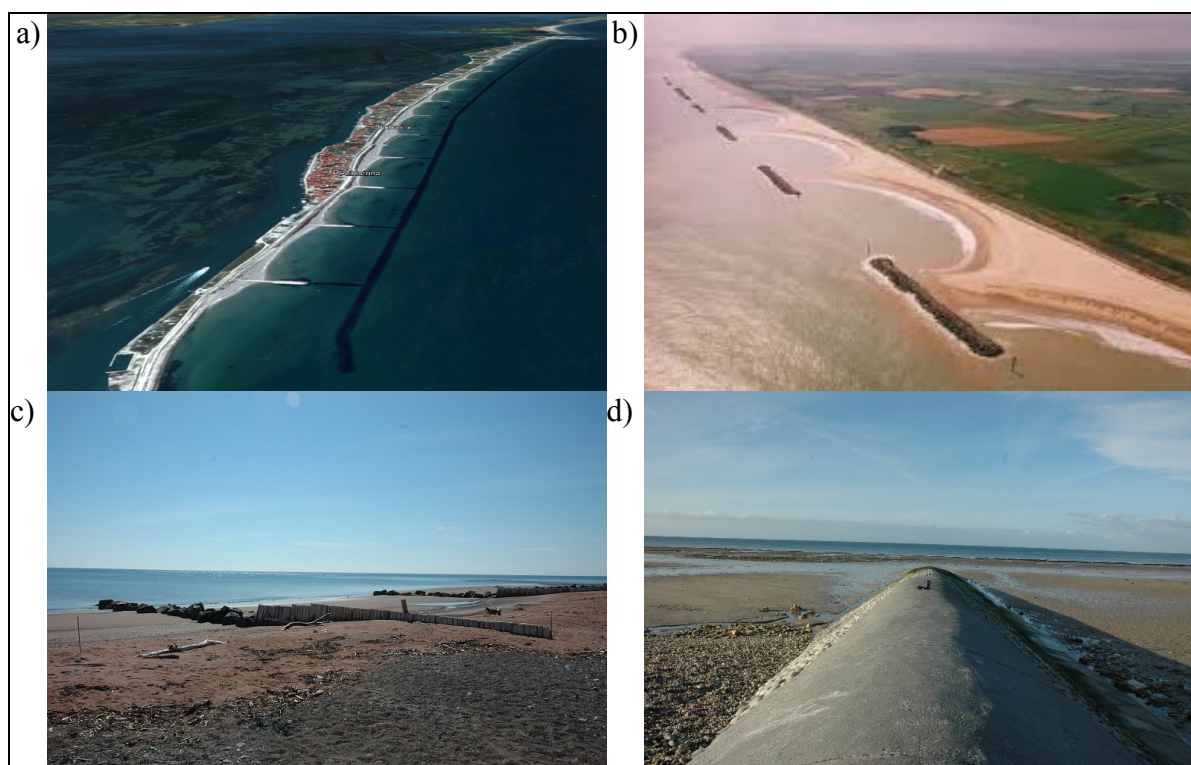


Figure 1.3 Mesures de lutte contre l'érosion côtière incluses dans la catégorie Structure de stabilisation a) Brise-lame détaché submergé – Deltares.nl; b) Brise-lame détaché émergé – www.gov.uk; c) Épis maritimes (bois) – Hope Town, Québec; d) Épi-buse (béton) – Luc-sur-Mer, France

Un déséquilibre du bilan sédimentaire peut être créé par une structure de stabilisation mal dimensionnée. Une telle situation provoque un surplus sédimentaire dans la zone d'implantation et un déficit en aval de celle-ci (Kim, 2010). Pour cette raison, plusieurs pays ont arrêté de les utiliser (CERC, 2006). Une étude de la dynamique hydrosédimentaire du



système côtier est donc nécessaire préalablement à l'aménagement d'une structure de stabilisation.

### **1.2.3 Ouvrage non structural**

Depuis la seconde partie du XX<sup>e</sup> siècle, l'utilisation de mesures de lutte contre l'érosion côtière (MLCEC) plus flexible est favorisée par les gestionnaires de zones côtières par rapport aux structures de renforcement et de stabilisation (Charlier, Chaineux et Morcos, 2005). Les ouvrages non structuraux sont des mesures de réaménagement du littoral agissant sur le bilan sédimentaire par l'ajout ou la rétention de sédiments. Les principales constituantes de cette catégorie sont présentées à la figure 1.4. Les ouvrages non structuraux permettent également de conserver l'aspect naturel du littoral. Les littoraux naturels ont tendance à retrouver un équilibre hydrosédimentaire plus facilement à la suite d'aléas climatiques en comparaison aux littoraux artificialisés par des structure de renforcement ou de stabilisation (Hill et al., 2004). Ce type d'intervention ne fait toutefois pas consensus, car certains acteurs de la zone côtière comparent l'utilisation de ce type de MLCEC à jeter de l'argent dans la mer (Daniel, 2001). Les effets des ouvrages non structuraux varient en fonction des MLCEC faisant partie de cette catégorie.

Les composantes de la dynamique hydrosédimentaire du système côtier ont une influence majeure sur l'évolution du trait de côte. Le choix d'une MLCEC doit être adapté aux caractéristiques d'un système côtier donné. Également, la quantité, la proximité et la qualité des matériaux peuvent influencer la faisabilité d'une MLCEC (Van Rijn, 2011).

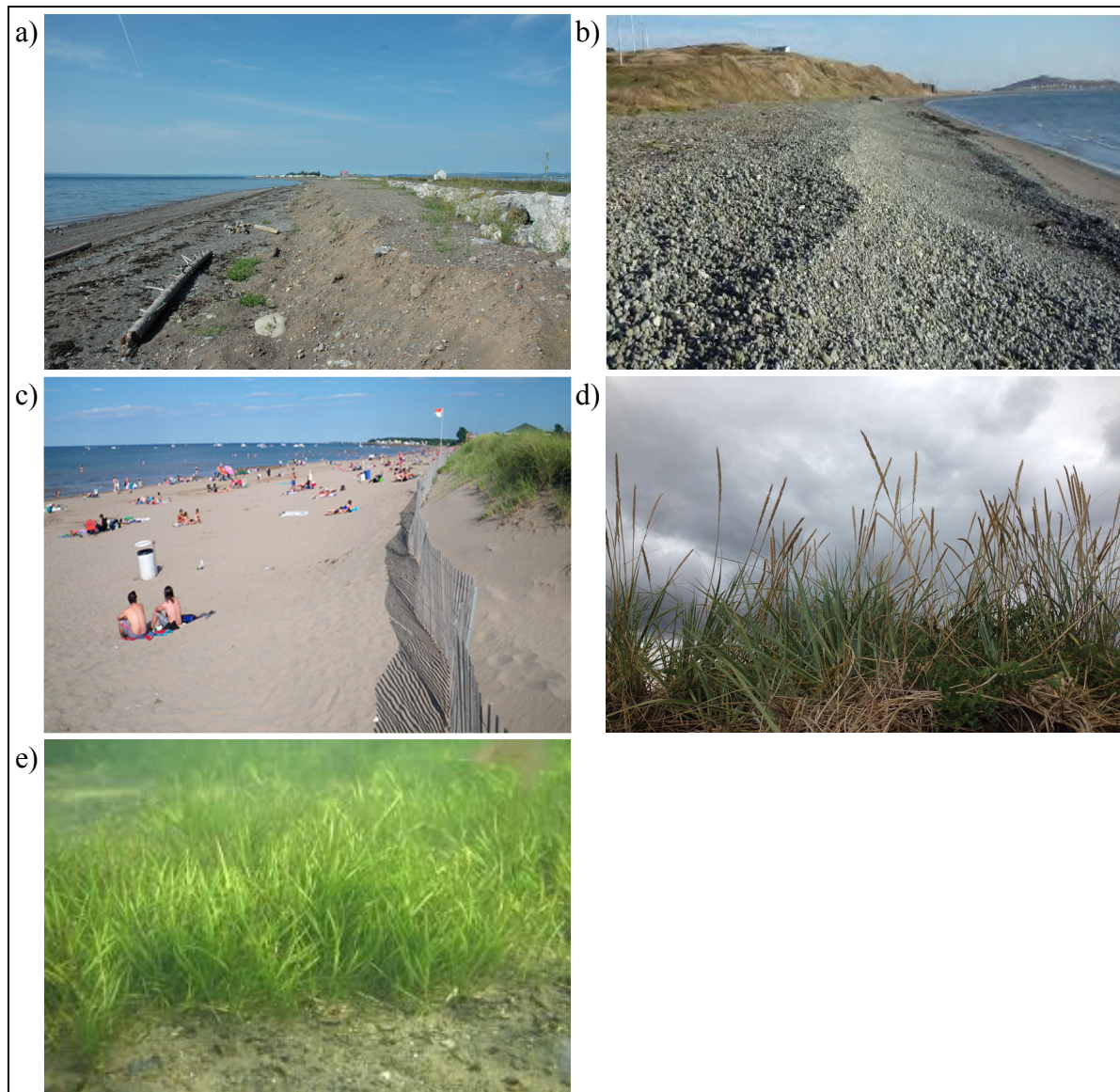


Figure 1.4 Mesures de lutte contre l'érosion côtière incluses dans la catégorie *Ouvrage non structural* a) Recharge de plage – Carleton-sur-Mer, Québec; b) riprap (plage en galet) - IDLM, Roche (2011); c) Ganivelle – Shédiac, Nouveau-Brunswick; d) Élyme des sables – Carleton-sur-Mer, Québec; e) Herbiers de zostère, cregim.org

### 1.3 Sélection de mesures de lutte contre l'érosion côtière

Au Québec, les études disponibles sur l'analyse de mesures de lutte contre l'érosion côtière (MLCEC) sont principalement réalisées aux endroits où l'érosion côtière représente un fort enjeu économique (tableau 1.5). Or, la caractérisation du système côtier, effectuée afin

d'identifier des solutions d'intervention, est essentielle afin d'établir une base de calcul nécessaire à la conception d'une MLCEC.

Tableau 1.5 Rapports d'analyse de mesures de lutte contre l'érosion côtière réalisés au Québec

<b>Études québécoise de caractérisation du système côtier</b>	<b>Auteurs</b>
Analyse des solutions en érosion côtière dans la baie de Plaisance (Îles-de-la-Madeleine)	Roche (2011)
Analyse de solutions en érosion côtière de la baie de Tadoussac	Génivar (2012)
Analyse de solutions en érosion côtière à l'anse aux Coques, Sainte-Luce	Génivar (2012)
Érosion des berges à proximité du nouveau pont - Havre-aux-Maisons (Îles-de-la-Madeleine)	Roche / Dessau (2014)

Les études sur l'analyse de MLCEC préalables à l'aménagement d'une solution d'intervention peuvent être dispendieuses. Toutefois, l'aménagement d'une solution d'intervention non adaptée au système côtier peut avoir des impacts néfastes sur les milieux physiques, sociaux et environnementaux de la zone côtière (Boyer-Villemaire et al., 2015; Morneau et al., 2001).

### 1.3.1 Caractérisation du système côtier

La caractérisation du système côtier repose sur (i) la spécification géomorphologique, (ii) la modélisation numérique de la dynamique hydrosédimentaire et (iii) l'analyse fréquentielle pour générer des données physiques nécessaires à la présélection et à la conception des mesures de lutte contre l'érosion côtière (MLCEC). L'étude du terrain et l'étude des caractéristiques dynamiques permettent d'aménager une MLCEC étant adapté à la dynamique hydrosédimentaire d'un système côtier donné (tableau 1.6).

Les éléments physiques du système côtier présenté au tableau 1.6 sont développés dans les paragraphes suivants.

Tableau 1.6 Éléments physiques du système côtier nécessaire à la présélection et à la conception des mesures de lutte contre l'érosion côtière

Étude du terrain	Étude des caractéristiques dynamiques
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bathymétrie [<math>H(x, y, z) = 0</math>]</li> <li>• Topographie [<math>H(x, y, z) = 0</math>]</li> <li>• Position du trait de côte [<math>F(x, y) = 0</math>]</li> <li>• Analyse granulométrique (mm)</li> <li>• Pente [<math>F(x, z) = 0</math>]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vitesse (m/s), direction (<math>^{\circ}</math>) et fetch (km) du vent</li> <li>• Hauteur (m) et période de vague (s)</li> <li>• Vitesse (m/s) et direction des courants (<math>^{\circ}</math>)</li> <li>• Niveau d'eau (m)</li> <li>• Runup</li> </ul>

### Spécification géomorphologique

La caractérisation du système côtier s'appuie sur un levé topographique, un levé bathymétrique et un levé GPS ainsi qu'un échantillonnage sédimentaire pour déterminer les données géomorphologiques du site à l'étude. L'étude topographique du littoral s'appuie sur un relevé aéroporté ou terrestre, le positionnement du trait de côte s'appuie sur un levé D-GPS et le levé bathymétrique s'appuie sur un relevé multifaisceaux ou monofaisceaux (Bernatchez et al., 2010; CIDCO, 2011). La caractérisation géomorphologique est divisée en trois procédures (figure 1.5) : (i) profil de plage; (ii) granulométrie; (iii) modélisation bathymétrique.

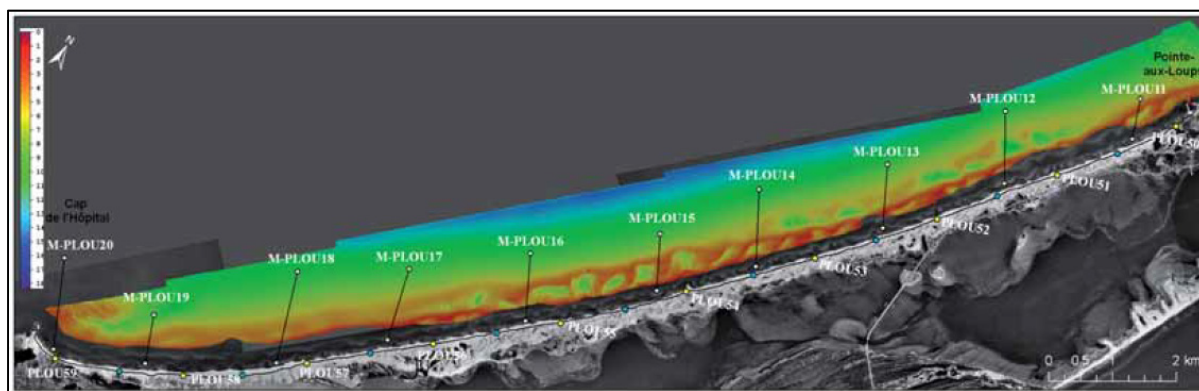


Figure 1.5 Modélisation de la bathymétrie ainsi que la localisation des profils de plage et des échantillons granulométriques à Pointe-aux-Loups aux Îles-de-la-Madeleine  
tirée de : Bernatchez et al. (2010)

Le profil de plage est la représentation graphique de l'élévation verticale du terrain en fonction de la distance horizontale, mesurée à partir d'un point de référence donné. Il est déterminé avec un levé topographique, à l'aide d'un D-GPS ou d'un relevé lidar, et de données bathymétriques, à l'aide d'un relevé multifaisceaux ou monofaisceaux. Le profil de plage est employé sous forme de transects pour évaluer la faisabilité technique des MLCEC en effectuant le calcul de la pente de la plage.

La granulométrie est la distribution statistique des dimensions sédimentaires d'un échantillonnage. Le diamètre sédimentaire médian ( $d_{50}$ ) est utilisé pour la modélisation numérique de la dynamique hydrosédimentaire afin de simuler la rugosité du fond marin. Également, il est utilisé pour effectuer la conception de certaines MLCEC. De plus, l'étendu et l'écart-type des échantillons sédimentaires sont considérés dans certains secteurs où le substrat est hétérogène.

La modélisation bathymétrique est une représentation géoréférencée en trois dimensions qui s'appuie sur un logiciel pour traiter les levés topographique, bathymétrique et GPS. Une interpolation, effectuée par le logiciel de traitement, peut être réalisée afin de couvrir la zone intertidale, laissée sans point entre les levés topographique et bathymétrique. Dans les secteurs avec peu de sédiments en suspension, le LiDar bathymétrique peut être utilisé à marée basse afin de couvrir la zone intertidale. Cette méthode est toutefois très dispendieuse.

### **Modélisation numérique**

La modélisation numérique permet d'analyser l'évolution des caractéristiques dynamiques du système côtier. Elle est employée pour décrire un ensemble d'équations mathématiques reproduisant l'état et l'évolution d'un système côtier sous l'influence de certaines variables (Vaidya, Kori et Kudale, 2015). Deux types de modélisation numérique sont utilisés (tableau 1.7) : (i) modélisation paramétrique du régime de vagues au large et (ii) modélisation de la distribution spectrale du régime de vagues.

La modélisation de vague paramétrique vise à prédire les caractéristiques des vagues ( $H_s$ ,  $T_s$  et direction) d'un site en eau profonde en s'appuyant sur une série de données historiques de

vent à 10 mètres ( $U_{10}$  et direction) enregistrées à une station météorologique à proximité du site à l'étude (Neumeier et al., 2013). Ce type de modélisation est employé afin de déterminer les conditions aux limites du système côtier traité par le logiciel de modélisation de la distribution spectrale du régime de vague. La modélisation de vague paramétrique permet de combler le manque de données concernant les caractéristiques des vagues aux limites de la zone à l'étude.

Tableau 1.7 Comparaison des modules de modélisation numérique du régime de vague à proximité du littoral.

<b>Modules utilisés</b>	<b>Fonctions</b>	<b>Intrants</b>	<b>Extrants</b>
Modélisation paramétrique de vagues	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prédiction de vagues en eau profonde</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caractéristiques des vents</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hauteur significative (<math>H_s</math>)</li> <li>• Période de pointe (<math>T_p</math>)</li> </ul>
Distribution spectrale du régime de vagues	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Génération, décroissance et transformation de vagues</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bathymétrie</li> <li>• Niveau d'eau</li> <li>• Courants</li> <li>• Caractéristiques des vents</li> <li>• Granulométrie</li> <li>• Glaces</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hauteur significative (<math>H_s</math>)</li> <li>• Hauteur maximale (<math>H_{max}</math>)</li> <li>• Période de pointe (<math>T_p</math>)</li> <li>• Période moyenne (<math>T_{01}</math>)</li> <li>• Direction moyenne</li> <li>• Composante de vitesse</li> </ul>

La modélisation de vague paramétrique vise à prédire les caractéristiques des vagues ( $H_s$ ,  $T_s$  et direction) d'un site en eau profonde en s'appuyant sur une série de données historiques de vent à 10 mètres ( $U_{10}$  et direction) enregistrées à une station météorologique à proximité du site à l'étude (Neumeier et al., 2013). Ce type de modélisation est employé afin de déterminer les conditions aux limites du système côtier traité par le logiciel de modélisation de la distribution spectrale du régime de vague. La modélisation de vague paramétrique permet de combler le manque de données concernant les caractéristiques des vagues aux limites de la zone à l'étude.

La modélisation de la distribution spectrale s'appuie sur les caractéristiques du régime de vague en eau profonde et sur les caractéristiques géomorphologiques disponibles pour établir un régime de vague à proximité du littoral. La distribution spectrale du régime de vague

utilise l'équation du bilan d'action des vagues (1.1) représenté par le spectre de densité d'action des vagues  $N(\sigma, \theta)$  pour définir leur propagation dans le système côtier en fonction du temps (Holthuijsen, 2007).

$$N = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (1.1)$$

$$\sigma = \sqrt{gk \tanh(kh)} \quad (1.2)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1.3)$$

La variable  $E$  est la densité énergétique,  $\sigma$  est la fréquence angulaire (rad/s),  $\theta$  est la direction du régime de vague,  $g$  est l'accélération gravitationnelle ( $m/s^2$ ),  $k$  est le nombre d'ondes ( $m^{-1}$ ) et  $\lambda$  est la longueur d'onde (m).

Trois instituts ont développé des logiciels de modélisation numérique des systèmes côtiers qui sont fréquemment mentionnés dans la littérature : *Coastal Hydraulics Laboratory* (CHL), *Deltares* et *Danish Hydraulics Institute* (DHI). Ces logiciels sont scindés en plusieurs modules numériques spécialisés. La distribution spectrale du régime de vague est respectivement effectuée par les modules numériques suivants : STWAVE, D-Wave (Swan) et MIKE 21 SW.

### Analyse fréquentielle

L'évolution rapide des caractéristiques dynamiques du système côtier est influencée par les événements météorologiques. Or, l'imprévisibilité des événements météorologiques amène à utiliser la notion de risque dans le processus de conception d'une MLCEC. L'analyse fréquentielle est utilisée dans le processus de conception des MLCEC afin d'établir une période de retour de hauteur de vague et de niveau d'eau de conception (Holthuijsen, 2007).

La distribution de Weibull (1.4) est utilisée pour déterminer la période de retour de hauteur de vague significative de dimensionnement (Holthuijsen, 2007). En s'appuyant sur des séries de données historiques, cette distribution statistique est utilisée pour effectuer l'analyse fréquentielle à long terme de la hauteur de vague significative de dimensionnement (Holthuijsen, 2007). Cette donnée est employée pour la conception des MLCEC.

$$Pr\{H_S \leq H_{S_i}\} = \begin{cases} 1 - e^{\left[-\left(\frac{H_{S_i}-A}{B}\right)^C\right]} & \text{pour } H_S > A \text{ et } C > 0 \\ 0 & \text{pour } H_S \leq A \end{cases} \quad (1.4)$$

$$B = H_{rms} = \sqrt{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i^2\right)} \quad (1.5)$$

$H_S$  est la hauteur de vague significative.  $H_{S_i}$  est la hauteur de vague significative observée.  $A$  est un paramètre de localisation sur l'axe des  $X$ .  $C$  est un paramètre de forme.

### 1.3.2 Présélection des mesures de lutte contre l'érosion côtière

La présélection de mesures de lutte contre l'érosion côtière (MLCEC) s'appuie sur la caractérisation du système côtier et sur l'évaluation de la faisabilité technique des MLCEC pour définir les MLCEC applicables localement. Les caractéristiques du système côtier sont utilisées comme base de calcul pour l'évaluation de la faisabilité technique des MLCEC.

L'évaluation de la faisabilité technique des MLCEC s'effectue en fonction des normes et des recommandations du *Coastal Engineering Manual* (CEM) publié par la *US Army Corps of Engineers* (USACE). Ce manuel est la référence en matière de conception de MLCEC utilisée dans le domaine de l'ingénierie côtière. Le CEM fournit aux concepteurs les équations normatives nécessaires à la configuration de chaque MLCEC en fonction des données physiques du système côtier. La hauteur de vague significative ( $H_S$ ) et sa période ( $T$ ) sont les caractéristiques des vagues principalement utilisées lors de la conception (Holthuijsen, 2007). La hauteur de vague significative est définie comme étant la hauteur de vague moyenne du tiers supérieur de la série de données disponibles (Holthuijsen, 2007). Certains paramètres physiques généraux sont également à considérer lors de l'évaluation de la faisabilité technique d'une MLCEC (tableau 1.8) (CERC, 2006; Kasinatha Pandian et al., 2004; Kraus, 1988; Kraus et McDougal, 1996).

Le cycle de vie, mesuré en année, est employé pour déterminer la période de retour des événements météorologiques extrêmes et pour dimensionner les caractéristiques des



MLCEC. Le niveau d'eau total est un paramètre utilisé pour déterminer l'élévation des MLCEC nécessaires pour assurer la sécurité de la population et des infrastructures côtière. La variabilité saisonnière du trait de côte est utilisée pour positionner une MLCEC sur le littoral.

Tableau 1.8 Paramètres physiques généraux à considérer lors de l'évaluation de la faisabilité technique d'une mesure de lutte contre l'érosion côtière

<b>Paramètres généraux de conception</b>	
• Cycle de vie (année)	• Niveau d'eau total (m)
• Élévation de la surcote maximale (m)	• Débit de franchissement (m <sup>3</sup> /s)
• Augmentation du niveau de la mer (m)	• Variabilité saisonnière du trait de côte (m)
• Remonté de la vague (m)	

### 1.3.3 Aide à la décision

Une démarche systémique d'une problématique environnementale est nécessaire afin de considérer l'ensemble des impacts potentiels sur le système à l'étude. Les impacts potentiels peuvent être identifiés en mettant en interaction les composantes du système, tout en considérant les enjeux et les apprentissages tirés des expériences antérieures (Dessau, 2013). Les enjeux peuvent diverger selon les orientations des différents organismes de la zone côtière. Cette divergence doit donc être cernée par l'application de critères décisionnels servant à orienter les décideurs dans la sélection d'une mesure de lutte contre l'érosion côtière (MLCEC) parmi de multiples options. L'orientation des décideurs nécessite toutefois un principe d'entonnoir afin d'éliminer les MLCEC inadéquates. Ainsi, les éléments suivants sont intéressants à considérer pour orienter le décideur : (i) démarche de la qualité totale, (ii) outil d'aide à la prise de décision et (iii) processus itératif.

#### Qualité totale

La qualité totale est une philosophie développée dans les années 1950 dans le but de stimuler la productivité des entreprises en passant par une autonomisation du personnel. Les trois principes fondamentaux de la qualité totale sont la concertation, le processus de proaction et de rétroaction ainsi que la mise à la disposition de la collectivité (tableau 1.9) (Hausler, Béron et Hade, 1994).

Tableau 1.9 Description des principes fondamentaux de la qualité totale

Principes de la qualité totale	Description des principes
Concertation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consultation des acteurs de la zone côtière pour effectuer l'analyse</li> </ul>
Proaction	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utilisation d'un modèle numérique pour évaluer les effets temporels de la MLCEC sur la dynamique hydrosédimentaire du système côtier</li> </ul>
Rétroaction	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modélisation des processus littoraux permettant de concevoir une MLCEC adaptée au système côtier</li> </ul>
Mise à la disposition de la collectivité	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Considération des interactions entre les aspects environnementaux, socio-économiques et techniques de façon à minimiser les rétroactions positives sur la zone côtière</li> </ul>

En considérant la notion de productivité sur la base de l'approche systémique d'une problématique d'érosion côtière, l'application de la démarche de la qualité totale permet de faire un contrôle de la qualité du processus de conception de MLCEC tout en véhiculant des valeurs analogues à la gestion intégrée du Saint-Laurent (GISL). Les principes fondamentaux de la qualité totale peuvent également être utilisés pour effectuer une analyse des expériences passées. Le tableau 1.10 présente l'analyse, selon les principes de la qualité totale, des quatre rapports disponibles, réalisés entre 2011 et 2014, traitant de l'étude de solution en érosion côtière.

Les constatations suivantes en sont tirées :

- **Concertation** : Une forme de consultation est mentionnée dans 50 % des rapports.
- **Proaction** : Une simulation à long terme de l'effet des MLCEC sur la dynamique hydrosédimentaire n'est effectuée dans aucun des rapports.
- **Mise à la disposition de la collectivité** : Une considération de l'ensemble des interactions de la zone côtière est effectuée dans un des quatre rapports, alors que deux des quatre n'en traitent pas.

Tableau 1.10 Analyse, selon les principes de la qualité totale, de quatre rapports d'ingénierie traitant de l'étude de solution en érosion côtière réalisés entre 2011 et 2014

Rapports	Concertation	Proaction et rétroaction	Mise à la disposition de la collectivité
Analyse des solutions en érosion côtière dans la Baie de Plaisance (IDLM) – Roche (2011)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aucune mention</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aucune simulation à long terme</li> <li>• Modélisation de vagues et de courants littoraux</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aucune mention</li> </ul>
Analyse de solutions en érosion côtière de la baie de Tadoussac – Génivar (2012)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Municipalité</li> <li>• Ministère de la Sécurité publique</li> <li>• Citoyens</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aucune simulation à long terme</li> <li>• Conception pour 30 ans</li> <li>• Modélisation de vagues et de courants littoraux</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Minimiser les impacts potentiels sur l'écosystème du parc marin du Saguenay</li> <li>• Assurer la viabilité récréotouristique de la plage de la baie de Tadoussac</li> </ul>
Analyse de solutions en érosion côtière à l'anse aux Coques, Sainte-Luce – Génivar (2012)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Municipalité</li> <li>• Ministère de la Sécurité publique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aucune simulation à long terme</li> <li>• Conception pour 30 ans</li> <li>• Modélisation de vagues et de courants littoraux</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aucune mention de possibles impacts environnementaux</li> <li>• Maintenir la valeur récréotouristique de la plage</li> </ul>
Érosion des berges à proximité du nouveau pont - Havre-aux-Maisons – Roche / Dessau (2014)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aucune mention</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aucune simulation à long terme</li> <li>• Modélisation de vagues</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aucune mention</li> </ul>

### Outil d'aide à la prise de décision

La fonction d'ordonnancement, généralement utilisée dans la gestion de système de production, est utile pour prévoir l'organisation des activités dans le contexte d'une problématique environnementale. Cette fonction dirigeant la sélection d'une solution d'intervention peut être abordée sous les angles monocritère ou multicritère. Cette fonction est couramment source de dilemmes, car impliquée dans des situations où plusieurs acteurs aux intérêts divers sont concernés (Ounnar et al., 2013). Or, l'analyse multicritère est efficace

pour évaluer des MLCEC dans un contexte où aucune solution ne satisfait entièrement tous les critères de sélection (Caillet, 2003) et pour intégrer dans le processus de conception une démarche participative réunissant les acteurs liés à de multiples domaines de la zone côtière. Lorsqu'un problème est complexe et que des conflits sont possibles, l'analyse multicritère permet de présenter des solutions de façon structurée et systémique (Garmendia et al., 2010) en fonction d'opinions divergentes, multidimensionnelles et incertaines (Félix et al., 2012) adhérant ainsi à la démarche de la GISL.

Les méthodes d'analyse multicritère de divers types peuvent être utilisées dans plusieurs domaines d'application (Zoppi, 2007). Les points distinctifs majeurs entre chacune d'elles sont le type d'agrégation, l'algorithme, la méthode de pondération utilisée ainsi que le type de classement obtenu. L'agrégation des critères peut être complète, partielle ou locale. Une agrégation complète vise à réduire les  $n$  critères à un critère unique, en s'appuyant sur des jugements transitifs, alors que l'agrégation partielle respecte l'incomparabilité des critères en comparant les actions potentielles les unes aux autres afin d'établir des relations de surclassement (Maystre, Pictet et Simos, 1994). L'agrégation locale est basée sur une solution de départ et y compare d'autres solutions dans une procédure itérative (Ben Mena, 2000). L'analyse coûts-avantages est, entre autres, une méthode d'analyse utilisant ce type d'agrégation. Dans un même contexte, chacune des procédures peut mettre en évidence différentes MLCEC et le choix de la procédure dépend des priorités du gestionnaire (Casini et al., 2015). Le tableau 1.11 présente les principales méthodes d'analyse multicritère.

Les procédures les plus utilisées sont l'AHP et l'ELECTRE (Casini et al., 2015; Zoppi, 2007). Le tableau 1.12 présente les champs d'application des méthodes d'analyse multicritère AHP (Vaidya et Kumar, 2006) et ELECTRE (Maystre, Pictet et Simos, 1994; Schärting, 1996).

Tableau 1.11 Caractéristiques des principales méthodes d'analyse multicritère  
Tiré de Caillet (2003)

Analyse multicritère	Agrégation	Algorithme	Pondération	Classement
AHP ( <i>Analitical hierarchy Process</i> ) <i>Thomas L. Saaty</i>	Complète	Matrice inversement proportionnelle	Échelle de Saaty (1 à 9)	Hiérarchique (tableau synthèse)
ELECTRE ( <i>ÉLimination Et Choix Traduisant la Réalité</i> ) <i>Bernard Roy</i>	Partielle	Conditionnel à des paramètres de surclassement	Échelle numérique variable en fonction des critères	Graphe de dominance
MAUT ( <i>Multi-attribute utility theory</i> ) <i>Ralph Keeny et Howard Raiffa</i>	Complète	Utilité totale (Additive ou multiplicative)	Échelle numérique	Hiérarchique (Graphique)
PROMETHEE ( <i>Preference Ranking Organisation METHod for Enrichment Evaluations</i> ) <i>Jean-Pierre Brans</i>	Partielle	Conditionnel à des paramètres de surclassement	Échelle numérique et fonction de priorité	Graphe de dominance

Tableau 1.12 Champs d'application des méthodes d'analyse multicritère AHP et ELECTRE

AHP	ELECTRE
Éducation Finance Commerce Gestion environnementale Gouvernement Personnel Industrie Ingénierie Politique Production Santé Société	<u>Finance</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fonds de placement</li> <li>• Classement d'obligation</li> <li>• Prédiction de faillites</li> <li>• Crédit commercial</li> </ul> <u>Gestion environnementale</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lutte contre l'eutrophisation</li> <li>• Gestion des ressources en milieu forestier</li> <li>• Gestion des déchets</li> <li>• Gestion de l'eau</li> <li>• Gestion d'espaces naturels</li> <li>• Développement énergétique</li> </ul>

### Méthode AHP

La méthode AHP utilise une structure décisionnelle hiérarchique (figure 1.6), basée sur l'objectif global du projet, pour établir l'importance relative des critères d'aide à la décision dans le but de classer les MLCEC (Ounnar et al., 2013). Elle se réalise en trois étapes : (i) hiérarchisation des critères d'aide à la décision; (ii) hiérarchisation des MLCEC par rapport aux critères d'aide à la décision et (iii) hiérarchisation des MLCEC par rapport à l'objectif global. La procédure détaillée de la méthode AHP est présentée à l'ANNEXE II.

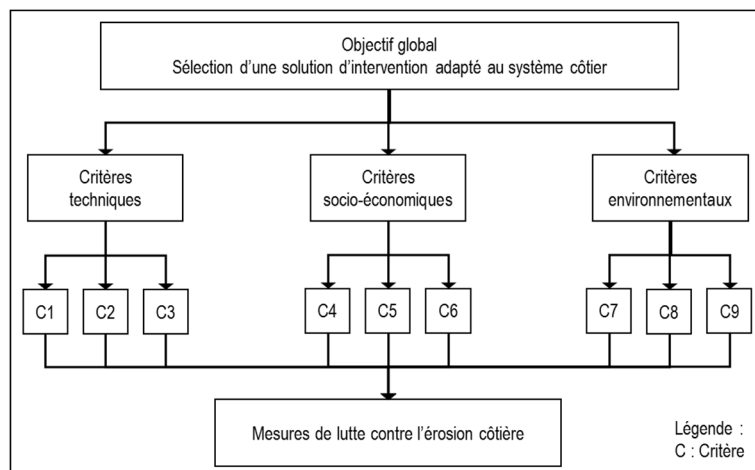


Figure 1.6 Schéma de la structuration décisionnelle hiérarchique de la procédure d'analyse multicritère AHP  
Adaptée de : Ounnar et al. (2013)

L'importance relative des critères d'aide à la décision vise à exprimer une priorité relative entre les critères dans une matrice de priorités en effectuant des comparaisons binaires ( $C_i$ ,  $C_j$ ) avec  $C_{ij} = 1/C_{ji}$  et  $C_{ii} = 1$ . Les comparaisons binaires sont effectuées avec l'échelle de pondération de Saaty dont les valeurs se situent entre 1 et 9 (tableau 1.13). La numérotation paire est utilisée pour nuancer les degrés de priorité.

Tableau 1.13 Échelle de pondération des degrés de priorité de la méthode AHP

Degrés de priorité	Poids associé
Même ordre de grandeur	1
Légèrement plus important	3
Plus important	5
Beaucoup plus important	7
Nettement plus important	9

### Processus itératif

L'application d'une succession d'itérations dans le processus d'aide à la prise de décision amène un principe d'entonnoir permettant d'éliminer les MLCEC inapplicables. L'intérêt est de remettre en question les résultats obtenus dans une boucle de réinterrogation (Gendron,

2004) de façon à ce que les recommandations aux décideurs reposent sur des MLCEC applicables.

La diversité des enjeux, des acteurs et des solutions conduit à des MLCEC dépendants des conditions locales et des attentes des acteurs. Un processus de hiérarchisation multivariable, basé sur des aspects techniques et tenant compte de critères socio-économiques et environnementaux, est donc pertinent afin d'identifier une MLCEC propre à chacun des milieux.





## CHAPITRE 2

### MÉTHODOLOGIE

L'approche méthodologique utilisée dans le cadre du présent travail repose sur l'intégration des processus technique et décisionnel afin de supporter la prise de décision en matière de mesures de lutte contre l'érosion côtière. Ces deux volets du travail s'appuient d'une part sur une modélisation numérique pour la simulation des conditions côtières locales et, d'autre part, sur une analyse multicritère intégrant les besoins et les attentes des acteurs impliqués dans le processus de décision afin de permettre une hiérarchisation des mesures de lutte contre l'érosion côtière envisagées. Une étude de cas démontre la combinaison des deux volets sur la base du développement du processus de traitement de l'information.

#### 2.1 Démarche proposée

La démarche proposée (figure 2.1) se divise en trois étapes : (i) caractérisation du site à l'étude; (ii) hiérarchisation des mesures de lutte contre l'érosion côtière (MLCEC); (iii) sélection d'une solution d'intervention. Les trois étapes s'appuient sur un ou plusieurs processus qui sont présentés dans les sous-sections suivantes.

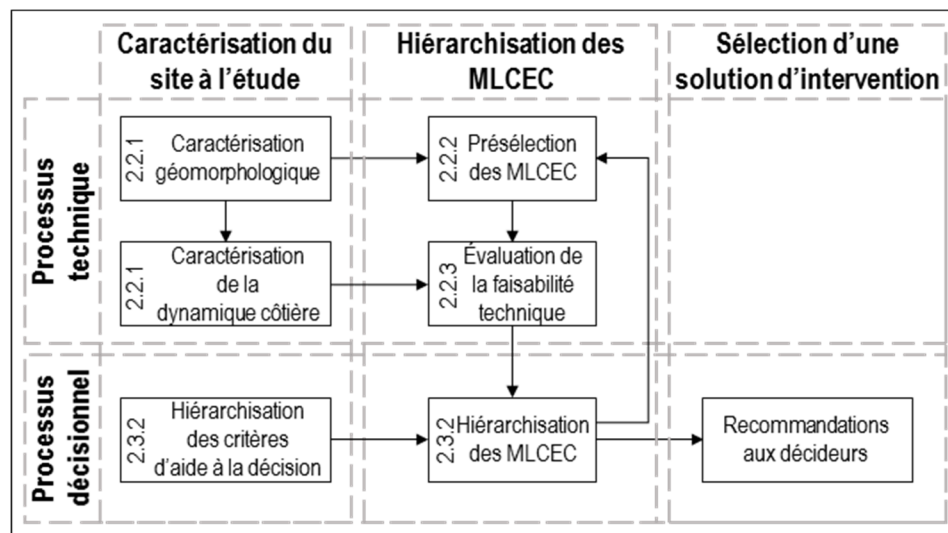


Figure 2.1 Schéma de principe de la démarche de sélection proposée

## 2.2 Processus technique

Le processus technique vise à définir les composantes du système côtier afin de caractériser la dynamique hydrosédimentaire et d'évaluer la faisabilité technique des mesures de lutte à l'érosion côtière (MLCEC). Il se conclut par l'identification de MLCEC préconçues et applicables localement.

### 2.2.1 Caractérisation du système côtier

La caractérisation du système côtier (figure 2.2) s'appuie sur les caractéristiques géomorphologiques et la dynamique hydrosédimentaire afin de déterminer une hauteur de vague significative de dimensionnement.

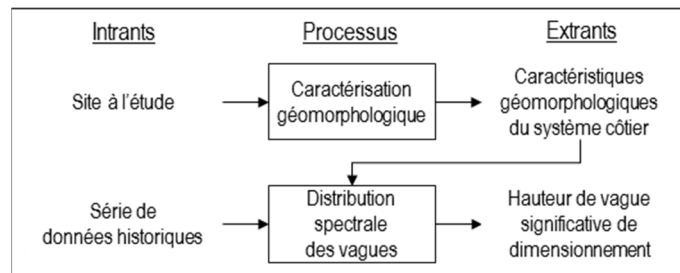


Figure 2.2 Schéma explicatif de la procédure de caractérisation du système côtier

#### Caractérisation géomorphologique

La caractérisation géomorphologique s'appuie sur des levés topographique, bathymétrique et D-GPS du site à l'étude pour établir un profil de plage et une modélisation de la bathymétrie du système côtier. Le profil de plage est utilisé pour la présélection et l'évaluation de la faisabilité technique des mesures de lutte contre l'érosion côtière. La bathymétrie modélisée et la série temporelle de niveaux d'eau sont utilisées pour la modélisation de la distribution spectrale des vagues.

### Caractérisation de la dynamique hydrosédimentaire

La caractérisation de la dynamique hydrosédimentaire repose sur la série de donnée historique de niveaux d'eau afin de déterminer une hauteur de vague significative de dimensionnement. La modélisation de la distribution spectrale des vagues et l'analyse fréquentielle sont les procédures utilisées pour générer la hauteur de vague significative de dimensionnement. La modélisation de la distribution spectrale des vagues s'appuie sur des données de vagues au large pour reproduire les phénomènes de réfraction et de dissipation des vagues dans le système côtier. La distribution spectrale des vagues est utilisée pour générer des hauteurs de vague significative ( $H_s$ ) et les périodes significatives ( $T_s$ ) aux points de calcul déterminés par l'utilisateur à proximité du littoral. Le modèle bidimensionnel MIKE 21 SW est employé pour la modélisation numérique de l'évolution du spectre de vagues aux points de calcul sélectionnés sur les abords du littoral.

$$H_s = \frac{1}{n/3} \sum_{j=1}^{n/3} H_j \quad (2.1)$$

$$T_s = \frac{1}{n/3} \sum_{j=1}^{n/3} T_{0,j} \quad (2.2)$$

$$\%Réfraction = 1 - \frac{H_{s \text{ au large}}}{H_{s i}} \quad (2.3)$$

En s'appuyant sur les résultats générés par la modélisation numérique du spectre de vagues, l'analyse fréquentielle repose sur la distribution statistique à long terme de Weibull pour déterminer des hauteurs de vague significative à différentes périodes de retour ( $T$ ). Ces informations sont utilisées lors de l'évaluation de la faisabilité technique des mesures de lutte contre l'érosion côtière.

#### 2.2.2 Présélection de mesures de lutte contre l'érosion côtière

Le travail repose sur les caractéristiques des principales mesures de lutte contre l'érosion côtière (MLCEC) répertoriées dans la littérature. La structuration cohérente des caractéristiques des différentes MLCEC prend la forme de fiches individuelles présentées à

l'annexe I permettant de faciliter le processus de présélection des MLCEC. La figure 2.3 présente le schéma explicatif de la présélection des MLCEC.

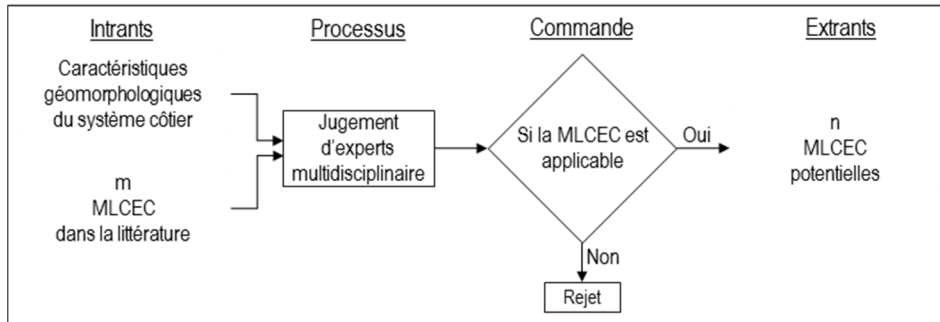


Figure 2.3 Schéma explicatif de la procédure de présélection des mesures de lutte contre l'érosion côtière

La procédure de présélection des MLCEC repose sur les caractéristiques géomorphologiques et sur les fiches de caractérisation individuelle des MLCEC pour permettre aux experts (équipe multidisciplinaire) d'émettre un jugement sur les MLCEC applicables dans le contexte de chaque système côtier. L'équipe multidisciplinaire s'assure de la cohérence entre le contexte socio-économiques d'implantation, les règles techniques et la dynamique hydrosédimentaire. Une liste de MLCEC présélectionnés est établie afin d'en évaluer la faisabilité technique.

### 2.2.3 Évaluation de la faisabilité technique des mesures de lutte contre l'érosion côtière

Le processus d'évaluation de la faisabilité technique repose sur la liste des  $n$  mesures de lutte contre l'érosion côtière (MLCEC) présélectionnées pour effectuer une conception préliminaire. Cette procédure s'appuie sur les normes du *Coastal Engineering Manual* et est effectuée en fonction d'une durée de vie utile de 30 ans. La figure 2.4 présente le schéma explicatif de l'évaluation de la faisabilité technique des MLCEC.

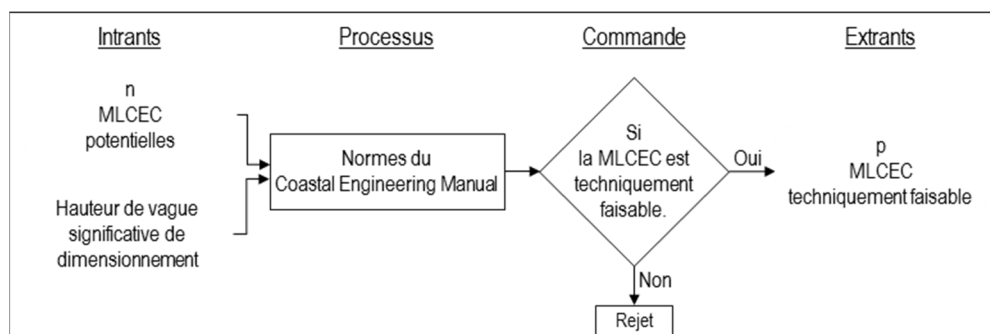


Figure 2.4 Schéma explicatif de la procédure d'évaluation de la faisabilité technique des mesures de lutte contre l'érosion côtière

La procédure d'évaluation de la faisabilité technique des MLCEC repose sur les caractéristiques géomorphologiques, la hauteur de vague significative de dimensionnement et le niveau d'eau afin d'évaluer les MLCEC potentielles en fonction des normes du CEM. Une liste de MLCEC techniquement réalisables est établie et, en cas de non-faisabilité technique d'une MLCEC, celui-ci est rejeté.

## 2.3 Processus décisionnel

Le processus décisionnel vise à assister les décideurs lors de la sélection d'une mesure de lutte contre l'érosion côtière (MLCEC) techniquement réalisable en s'appuyant sur une analyse multicritère. Celle-ci repose sur l'utilisation de critères d'aide à la décision applicables dans une situation d'érosion côtière, ainsi que sur la pondération de ces critères par les acteurs de la zone côtière. La procédure d'analyse multicritère *Analytic Hierarchy Process* (AHP) est utilisée dans ce travail. Le processus décisionnel se conclut par l'identification de MLCEC qui répondent aux intérêts des acteurs de la zone côtière.

### 2.3.1 Critères d'aide à la décision

Les interactions entre les aspects environnementaux, socio-économiques et techniques du système côtier sont représentées par des critères d'aide à la décision. Afin de définir les interactions ayant lieu dans le système côtier de façon exhaustive, opérationnelle, concise et

cohérente, la sélection de ces critères s'appuie sur les enjeux associés à la protection du littoral décrits dans la littérature scientifique traitant des zones côtières. Le tableau 2.1 présente une description des critères d'aide à la décision.

Tableau 2.1 Description des critères d'aide à la décision établis selon les enjeux associés à la protection du littoral

<b>Critères d'aide à la décision</b>		<b>Description</b>
Environnementaux	Modification des processus littoraux	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Effet sur l'accès aux réserves sédimentaires naturelles.</li> <li>• Effet sur la dynamique hydrosédimentaire.</li> </ul>
	Perturbations environnementales temporaires	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perturbations temporaire de la qualité de l'eau et des écosystèmes.</li> <li>• Fréquence de l'entretien nécessaire.</li> </ul>
	Changements environnementaux permanents	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Impacts sur l'abondance, la composition et la diversité des habitats fauniques et aquatiques.</li> <li>• Migration d'espèces exotiques envahissantes.</li> <li>• Disparition de l'écosystème.</li> </ul>
Socio-économiques	Intégration au paysage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Impact de la MLCEC sur le paysage.</li> <li>• Utilisation de matériaux s'arrimant convenablement au paysage.</li> </ul>
	Économie locale	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Appui à l'économie locale.</li> <li>• Impact de la MLCEC sur le tourisme dans les zones côtières.</li> <li>• Disponibilité locale de l'expertise et des matériaux pour l'aménagement de la MLCEC.</li> </ul>
	Loisirs	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Impact sur la pêche, les activités aquatiques, le nautisme et les activités pratiquées sur le littoral.</li> <li>• Espace suffisant pour la pratique de loisir.</li> </ul>
Techniques	Protection des infrastructures	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacité de la MLCEC à protéger les infrastructures côtières face à l'action des vagues et à la submersion.</li> </ul>
	Fiabilité structurale	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entretien requis à la suite d'un aléa côtier.</li> </ul>
	Changements climatiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conservation de l'efficacité de la MLCEC en considérant la fluctuation entre les scénarios de changements climatiques.</li> </ul>

### 2.3.2 Hiérarchisation

Le processus d'analyse des mesures de lutte contre l'érosion côtière (MLCEC) potentiellement applicables est basé sur l'ordonnancement de ces solutions par la méthode AHP. L'ordonnancement s'effectue en trois temps : (i) hiérarchisation des critères d'aide à la décision; (ii) hiérarchisation des MLCEC par rapport aux critères et (iii) hiérarchisation des MLCEC par rapport à l'objectif global.

Dans un premier temps, la hiérarchisation des critères d'aide à la décision (figure 2.5) permet d'établir leur importance relative en s'appuyant sur l'information collectée auprès d'organismes liés à la zone côtière. L'acquisition des informations se fait au moyen d'un questionnaire (annexe III) visant à identifier les priorités en matière de gestion de la zone côtière des organismes consultés. Cette étape est ensuite utilisée pour hiérarchiser les MLCEC ayant été jugées techniquement réalisables.

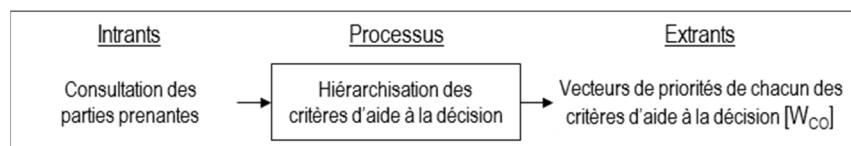


Figure 2.5 Schéma explicatif de la procédure de hiérarchisation des critères d'aide à la décision

Dans un deuxième temps, la hiérarchisation des MLCEC par rapport à chacun des critères (figure 2.6) s'appuie sur les caractéristiques des principales MLCEC (fiches, annexe I) comme étape intermédiaire entre la littérature scientifique et la pondération des MLCEC par critère. Pour une même étude de cas, la hiérarchie des MLCEC établie par rapport à chacun des critères demeure inchangée, peu importe l'organisme consulté, car elle se fait en fonction du système côtier à l'étude.

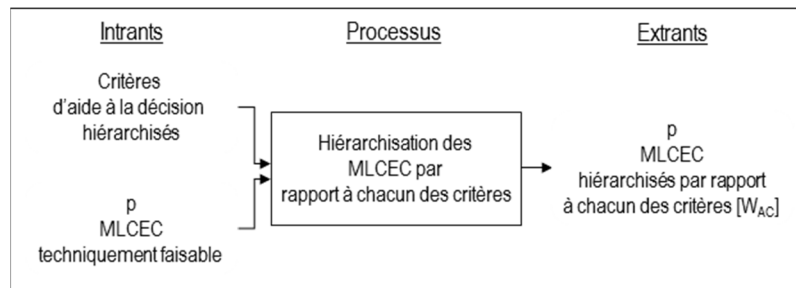


Figure 2.6 Schéma explicatif de la procédure de hiérarchisation des mesures de lutte contre l'érosion côtière par rapport à chacun des critères d'aide à la décision

Finalement, la hiérarchisation des MLCEC par rapport à l'objectif global (figure 2.7) est l'étape synthèse de la méthode AHP. L'analyse des résultats de cette étape permet d'évaluer les forces et les faiblesses des MLCEC.

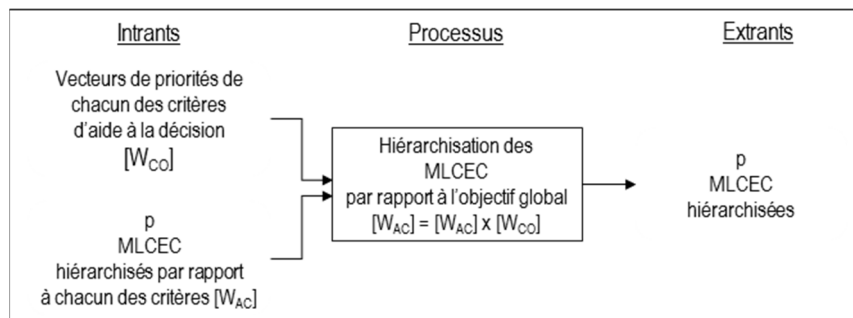


Figure 2.7 Schéma explicatif de la procédure de hiérarchisation des mesures de lutte contre l'érosion côtière par rapport à l'objectif global

Un processus itératif est inséré dans la démarche proposée (figure 2.8) au moyen d'une commande de type *si*. Cette commande est utilisée pour redéfinir, en cas de besoin, la liste de MLCEC préalablement à la sélection d'une solution d'intervention.



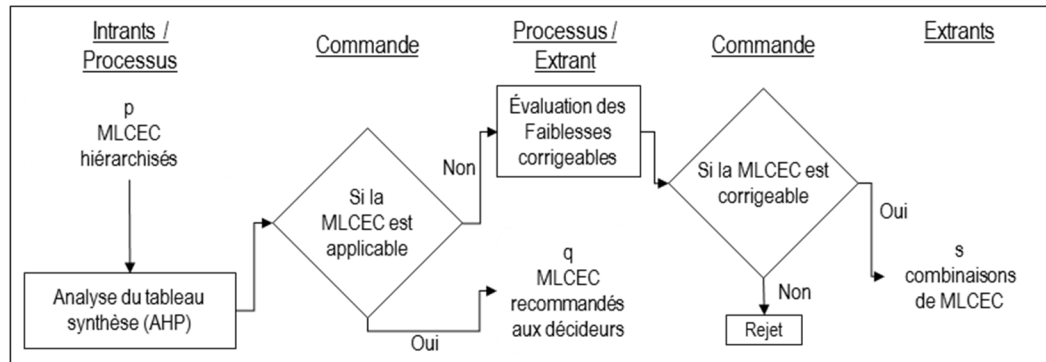


Figure 2.8 Schéma explicatif du processus itératif de la démarche proposée

$N_{SC}$  est le nombre de MLCEC considérée et  $n$  est le nombre minimal de MLCEC recommandée aux décideurs,  $n$  étant déterminé par l'évaluateur.

- si  $N_{SC} < n$ , une itération supplémentaire est effectuée. Dans un tel cas, l'analyse des forces et des faiblesses des MLCEC permet de former de nouvelles MLCEC en combinant divers types de MLCEC;
- si  $N_{SC} > n$ , les MLCEC hiérarchisées sont utilisées afin d'effectuer des recommandations aux décideurs en vue de la sélection d'une solution d'intervention.

### 2.3.3 Intégration de l'aspect financier

L'aspect financier est intégré sous la forme d'une estimation des coûts d'aménagement et d'entretien (30 ans) des mesures de lutte contre l'érosion côtière (MLCEC) hiérarchisées. Dans le cadre du projet, les rapports de Genivar (2012a; 2012b) et de Roche (2011) ont été utilisés comme référence pour effectuer l'estimation des coûts. La plage de données de coûts estimés disponibles est analysée en fonction du coût unitaire par mètre linéaire. La médiane est calculée et employée pour classer les MLCEC. Pour les MLCEC n'étant pas répertoriées dans ces rapports, les coûts ont été générés en faisant une moyenne pondérée entre les coûts estimés des MLCEC similaires. Le coût de chaque MLCEC est ensuite normalisé par rapport au coût de la MLCEC le plus élevé (2.4).

$$\text{Coût normalisé} = \frac{\text{Estimation MLCEC}_i}{\text{Estimation MLCEC}_{\max}} \quad (2.4)$$

Le coût normalisé est utilisé pour établir un indicateur d'efficacité. L'indicateur d'efficacité est un rapport quantitatif établi entre le pourcentage final normalisé des MLCEC obtenu avec la méthode AHP et leur coût respectif normalisé.

## **2.4 Caractéristiques de l'étude de cas**

La démonstration du potentiel et de l'intérêt de la démarche proposée pour la sélection d'une mesure de lutte contre l'érosion côtière (MLCEC) repose sur une étude de cas hypothétique développée en deux volets concrets indépendants, choisis en raison de la pertinence et de la disponibilité de leurs apports respectifs de données. Dans un premier temps, le processus technique [A] (étapes 2.2) est démontré en fonction des paramètres de la baie de Plaisance aux Îles-de-la-Madeleine. Dans un second temps, le processus décisionnel [B] (étapes 2.3) est démontré en fonction de données de la région de la Baie-des-Chaleurs en Gaspésie. Les résultats des deux processus, techniques et décisionnels, sont ensuite combinés pour élaborer une étude de cas hypothétique et démontrer le potentiel de la démarche proposée. La figure 2.9 présente les sources de données utilisées pour l'étude de cas.


Processus décisionnel [B] – Baie-des-Chaleurs, Gaspésie (Québec)		
Source des données	Entretiens consultatifs des acteurs de la zone côtière réalisés avec la firme PESCA Environnement	
Type de données	Pondération des critères d’aide à la décision environnementaux, socio-économiques et techniques pondérés	
		
Processus technique [A] – Baie de Plaisance, Îles-de-la-Madeleine (Québec)		
Source des données	LDGIZC (UQAR) CIDCO	Roche (2011)
Type de données	Levé topographique Levé bathymétrique Granulométrie (mm)	Hauteur de vagues au large (m) Niveau d’eau (m) (Cap-aux-Meules - #1970 (1964-2010))

Figure 2.9 Provenance des données utilisées pour l'étude de cas

#### 2.4.1 Processus technique

Le processus technique est démontré par une étude de cas située au nord-ouest de la baie de Plaisance aux Îles-de-la-Madeleine. La caractérisation géomorphologique du site à l'étude s'appuie sur les données du Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (LDGIZC) de l'Université du Québec à Rimouski (UQAR) et du Centre Interdisciplinaire de Développement en Cartographie des Océans (CIDCO). Les données

historiques de niveau d'eau et les données modélisées des caractéristiques des vagues aux larges proviennent des résultats du rapport de Roche (2011) réalisé à proximité du site à l'étude.

Le site à l'étude est caractérisé par une portion de la route 199 qui est menacée par l'érosion côtière. L'évaluation de la faisabilité technique des mesures de lutte contre l'érosion côtière est effectuée sur une longueur de 1000 m en fonction d'une période de retour de 30 ans. Un niveau d'eau extrême de 1,70 m ainsi qu'un diamètre sédimentaire médian ( $d_{50}$ ) de 0,25 mm sont utilisés pour la modélisation numérique de simulation du régime de vague en zone côtière.

#### 2.4.2 Processus décisionnel

La pondération des critères d'aide à la décision s'appuie sur des entretiens réalisés auprès d'organismes de la Baie-des-Chaleurs en Gaspésie avec la firme de services-conseils PESCA Environnement. Les représentants des organismes étaient des maires, des directeurs-généraux et des urbanistes. Les organismes consultés sont présentés au tableau 2.2.

Tableau 2.2 Organismes consultés avec la firme PESCA Environnement

• Comité ZIP Gaspésie	• Ville de Bonaventure
• Municipalité de Maria	• Ville de Carleton-sur-Mer
• Municipalité de Port-Daniel	• Ville de New Richmond
• Municipalité de Saint-Siméon	• Ville de Paspébiac
• Société du chemin de fer de la Gaspésie	

Les résultats de l'étude de cas, s'appuyant sur la démarche proposée et décrite dans la présente section, sont présentés au chapitre 3.

## **CHAPITRE 3**

### **RÉSULTATS**

Ce chapitre présente les résultats de l'étude de cas. Il se divise en trois sections : (i) caractérisation du site à l'étude; (ii) conception des mesures de lutte contre l'érosion côtière présélectionnées; (iii) analyse multicritère et hiérarchisation des mesures de lutte contre l'érosion côtière. Les deux premières sections sont consacrées aux résultats du processus technique de l'étude de cas et la troisième section présente quant à elle les résultats du processus décisionnel.

#### **3.1 Caractérisation du site à l'étude**

Les résultats de la caractérisation du site à l'étude effectuée dans le contexte de la baie de Plaisance aux Îles-de-la-Madeleine sont présentés dans le premier sous-chapitre. Celui-ci se divise en deux entités : (i) caractérisation géomorphologique; (ii) caractéristiques techniques du système côtier.

##### **3.1.1 Caractéristiques géomorphologiques**

Le processus de caractérisation géomorphologique repose sur les levés topographique, bathymétrique et GPS, ainsi que sur l'échantillonnage sédimentaire et la modélisation numérique pour produire le profil de plage et la bathymétrie modélisée. Les résultats des caractéristiques géomorphologiques sont présentés dans les sous-sections suivantes.

##### **Profil de plage**

Le profil de plage typique du site à l'étude est présenté à la figure 3.1 sur une longueur de 200 mètres. Il est utilisé pour la configuration des mesures de lutte contre l'érosion côtière (MLCEC) lors de la conception préliminaire.

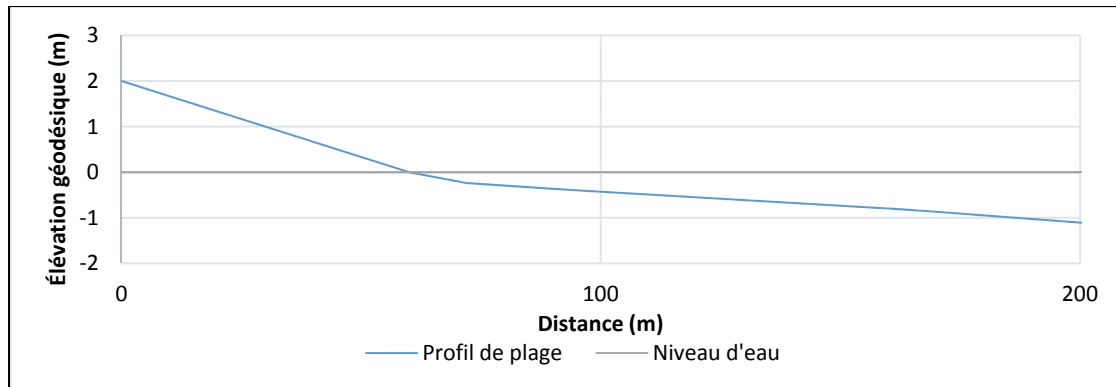


Figure 3.1 Profil de plage typique du site à l'étude

Cette figure montre que le profil de plage présente deux pentes distinctes : à partir du large vers le littoral, la pente est douce, puis elle s'accroît préalablement à l'intersection avec le zéro géodésique correspondant au niveau moyen des mers (NMM), puis elle s'accroît.

### Bathymétrie modélisée

La bathymétrie modélisée de la baie de Plaisance et une carte permettant de la localiser dans le golfe du Saint-Laurent sont présentées à la figure 3.2.

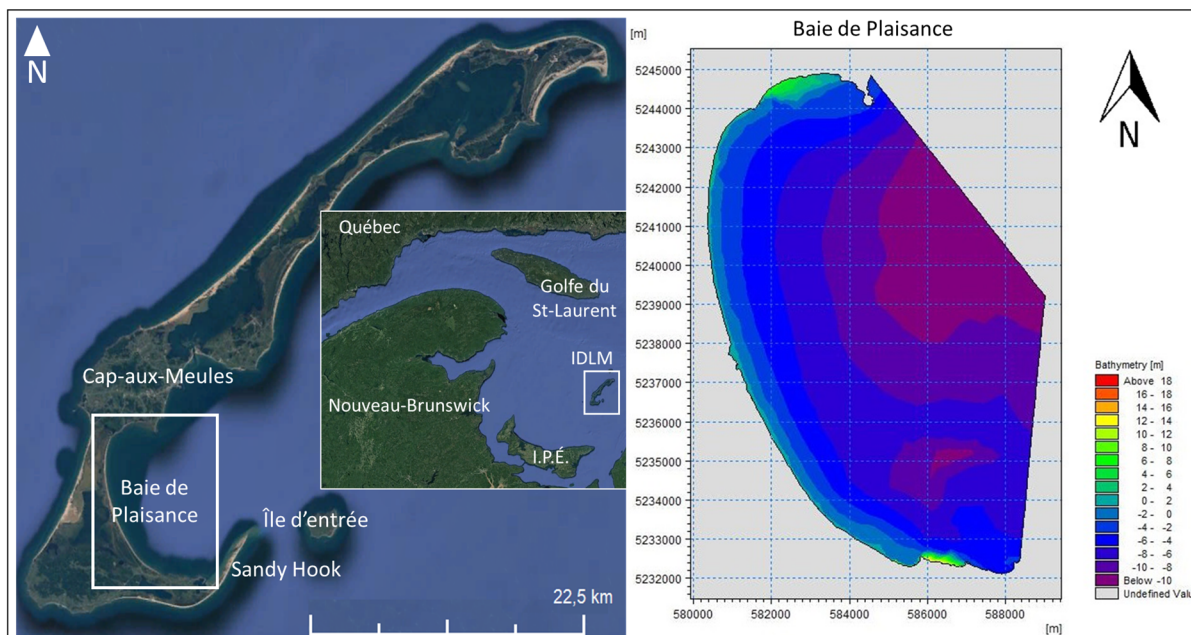


Figure 3.2 Localisation et bathymétrie de la baie de Plaisance aux Îles-de-la-Madeleine

La baie de Plaisance a une longueur d'environ 13 km et une largeur d'environ huit kilomètres. La figure 3.2 montre qu'en général la profondeur d'eau s'accroît graduellement, à partir d'une élévation inférieure à dix mètres vers une élévation supérieure à deux mètres. La bathymétrie est utilisée pour la modélisation numérique de la hauteur de vague significative nécessaire pour la conception des MLCEC.

### **3.1.2 Caractéristiques techniques du système côtier**

La caractérisation de la dynamique hydrosédimentaire repose sur la modélisation paramétrique de vagues, la modélisation numérique de simulation du régime de vague en zone côtière et l'analyse fréquentielle pour produire des périodes de retour de hauteur de vague significative et de niveau d'eau extrême. Les résultats de la caractérisation de la dynamique hydrosédimentaire sont présentés dans les sous-sections suivantes.

#### **Hauteur de vague significative**

La hauteur de vague significative est calculée par modélisation numérique aux points de calcul déterminés par l'utilisateur en fonction de vagues générées au large. La figure 3.3 montre la position des deux points de calcul utilisés sur le site à l'étude (P1 et P2), la position du point de génération des vagues au large ainsi que les barrières morphologiques du secteur de la baie de Plaisance.

Les points de calcul sont situés sur le littoral (P1) et à 50 m au large du littoral (P2). Deux points de calcul sont nécessaires afin d'ajuster les données de la dynamique hydrosédimentaire lors de l'évaluation de la faisabilité technique. La position du point de génération des vagues au large est tirée de l'étude réalisée par Roche (2011). Les barrières morphologiques du secteur de la baie de Plaisance servent à déterminer les provenances des vagues du large utilisées lors de la simulation (tableau 3.1).

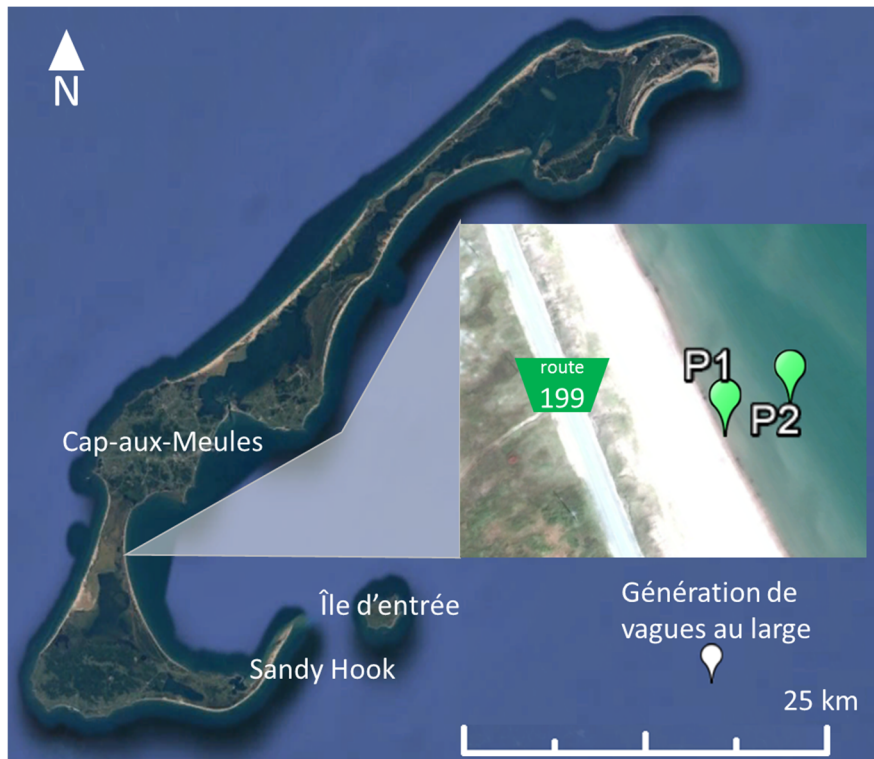


Figure 3.3 Position des deux points de calcul utilisés (P1 et P2), position du point de génération des vagues au large et la position des barrières morphologiques du secteur de la baie de Plaisance

Les hauteurs de vague significative aux points choisis sont calculées en fonction de données de hauteurs et de périodes de vagues au large, tirées de l'étude réalisée par Roche (2011), pour laquelle des scénarios ont été établis en fonction de deux à quatre périodes de vague. Le tableau 3.1 présente les résultats obtenus avec le modèle MIKE 21 SW pour les deux points de calculs.

Les résultats montrent que la hauteur significative des vagues diminue à l'approche du littoral, soit une diminution en moyenne de 49,5 % pour P2 et de 61,5 % pour P1. Une vague provenant du large perd donc en moyenne 12 % de sa hauteur dans les 50 m avant de déferler sur le littoral.



Tableau 3.1 Hauteurs de vague significative aux points de calcul près de la côte selon des caractéristiques de vagues au large

Provenance des vagues	Hauteur et période de vague au large Roche (2011)			Hauteur de vague significative aux points de calculs près de la côte (MIKE 21 SW)			
	Scénario	Période (Tp)	Hauteur au large (Hs)	H <sub>s</sub> (P2)	Réfraction	H <sub>s</sub> (P1)	Réfraction
	-	(s)	(m)	(m)	(%)	(m)	(%)
Nord-est	S1	12	4,030	1,953	51,5	1,491	63,0
	S2	14	5,570	2,040	63,4	1,592	71,4
Est-nord-est	S3	10	2,810	1,903	32,3	1,422	49,4
	S4	12	4,170	1,986	52,4	1,529	63,3
	S5	14	6,000	2,063	64,6	1,623	73,0
Est	S6	8	1,970	1,848	6,2	1,348	31,6
	S7	10	2,880	1,909	33,7	1,438	50,1
	S8	12	3,990	1,985	50,3	1,535	61,5
	S9	14	5,710	2,072	63,7	1,634	71,4
Est-sud-est	S10	12	4,410	1,989	54,9	1,541	65,1
	S11	14	7,080	2,080	70,6	1,645	76,8
Moyenne	-	-	-	-	49,5	-	61,5

### Hauteur de vague significative de dimensionnement

Pour la conception des mesures de lutte contre l'érosion côtière (MLCEC) en un point *PI*, le tableau 3.2 présente les résultats de l'analyse fréquentielle des hauteurs de vague significative sur le littoral (*PI*) (tableau 3.1), pour des périodes de retour entre 2 et 100 ans.

Tableau 3.2 Hauteurs de vague significative de dimensionnement (P1)  
obtenues avec la distribution de Weibull

Période de retour (T) (an)	Fréquence de retour (1/T) (1/an)	Hauteur de vague significative de dimensionnement (H <sub>s</sub> ) (m)
		P1
100	0,99	2,285
50	0,98	2,283
30	0,97	2,280
20	0,95	2,276
5	0,8	2,241
2	0,5	2,170

Sur la base des résultats exprimés dans le tableau 3.2, les hauteurs de vague significative de dimensionnement obtenues avec la distribution de Weibull présentent un écart de 9 mm entre les périodes de retour 20 et 100 ans, soit une augmentation de la hauteur de 0,4 %. Pour la conception des MLCEC, la hauteur de vague retenue est celle d'une période de retour de 30 ans, soit 2,280 m.

### **3.2 Conception des mesures de lutte contre l'érosion côtière présélectionnées**

Les résultats de la conception des mesures de lutte contre l'érosion côtière (MLCEC) présélectionnées dans le contexte de la baie de Plaisance aux Îles-de-la-Madeleine sont présentés dans le deuxième sous-chapitre. Celui-ci se divise en deux entités : (i) présélection des MLCEC; (ii) évaluation de la faisabilité technique des MLCEC.

#### **3.2.1 Présélection des mesures de lutte contre l'érosion côtière**

Le littoral du site à l'étude est de type tombolo dunifié (accumulation basse de sable qui relie la côte à un îlot), sur lequel la route 199 a été aménagée avec une surélévation d'environ deux mètres par rapport au NMM actuel. En s'appuyant sur une analyse de la littérature et du milieu d'implantation, les MLCEC listées dans le tableau 3.3 sont présélectionnées afin d'évaluer la faisabilité technique sur le site à l'étude.

Tableau 3.3 Liste de mesures de lutte contre l'érosion côtière présélectionnées

• Brise-lame émergé	• Enrochement	• Mur de protection	• Riprap
• Brise-lame submergé	• Épis maritimes	• Recharge de plage	

#### **3.2.2 Évaluation de la faisabilité technique**

L'évaluation technique des mesures de lutte contre l'érosion côtière (MLCEC) identifiées au tableau 3.3 est effectuée en considérant les caractéristiques du site à l'étude. La figure 3.4 présente le profil des MLCEC dont la conception préliminaire est effectuée en fonction du

profil de plage, de la hauteur de vague significative de dimensionnement et des normes du CEM.

Sur la base des informations disponibles, quatre MLCEC ont été dimensionnées de façon préliminaire selon les caractéristiques du site à l'étude. Ainsi, les résultats de la figure 3.4 montrent que les MLCEC aptes à être aménagées sur le littoral de la baie de Plaisance afin de répondre à la problématique d'érosion côtière.

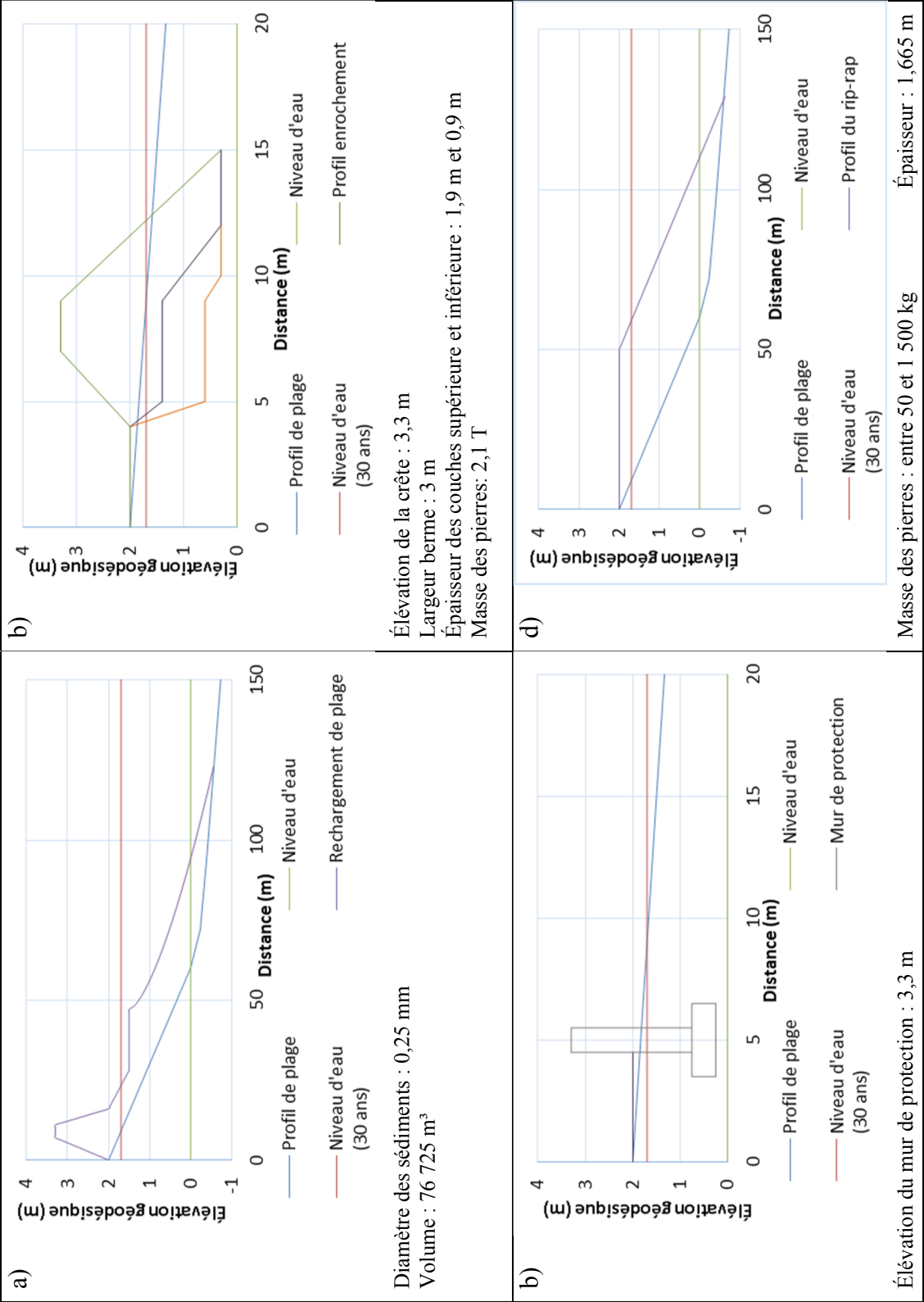


Figure 3.4 Profil des mesures de lutte contre l'érosion côtière à la suite de la conception préliminaire (a) Recharge de plage; (b) Entrochement; (c) Mur de protection; (d) Riprap

### 3.3 Processus d'aide à la sélection des mesures de lutte contre l'érosion côtière

Le processus décisionnel, par la méthode AHP, permet de hiérarchiser des mesures de lutte contre l'érosion côtière (MLCEC) afin d'aider les décideurs à identifier une solution d'intervention. Les quatre MLCEC ayant été prédimensionnées à la section 3.2.2 ont été retenues pour le processus décisionnel. Les MLCEC *brise-lames émergés* et *submergés* de même qu'*épis maritimes* ont également été retenues, faute de raison valable pour les rejeter. Les résultats du processus décisionnel de l'étude de cas effectuée dans le contexte de la Baie-des-Chaleurs en Gaspésie sont présentés dans le deuxième sous-chapitre et sont divisés en quatre sections : (i) critères d'aide à la décision; (ii) MLCEC hiérarchisées; (iii) itérations subséquentes; (iv) intégration de l'aspect financier.

#### 3.3.1 Critères hiérarchisés d'aide à la décision

Les résultats de la hiérarchisation des critères d'aide à la décision effectuée avec la méthode AHP (annexe II) sont présentés au tableau 3.4. La section *Matrice d'évaluation des critères d'aide à la décision* montre la pondération des comparaisons binaires et la colonne *Résultats* montre le vecteur de priorité de chacun des critères d'aide à la décision qui en résulte. La pondération des critères d'aide à la décision effectuée par les représentants de la ville de Bonaventure a été utilisée pour l'étude de cas.

Les informations compilées au tableau 3.4 montrent que les représentants de la ville de Bonaventure jugent le critère *Protection des infrastructures* comme étant le plus important avec une pondération de 32,9 %. Un écart de 13,9 % le sépare du deuxième critère, *Économie locale*, ayant une pondération de 18,9 %. Alors que l'écart moyen du poids des critères séparant les positions est de 3,9 % avec une médiane de 2,2 %, le critère *Protection des infrastructures* est largement supérieur aux autres critères d'aide à la décision.

Tableau 3.4 Matrice d'évaluation des critères d'aide à la décision de la méthode AHP en fonction des priorités en matière de gestion de la ville de Bonaventure

Matrices d'évaluation des critères d'aide à la décision											Vecteurs de priorité (%)
Degré de préférence	Poids	Protection des infrastructures	Économie locale	Processus littoraux	Changements environnementaux	Perturbations environnementales	Intégration au paysage	Loisirs	Fiabilité structurale	Changements climatiques	
Même ordre de grandeur	1										
Légèrement plus important	3										
Plus important	5										
Beaucoup plus important	7										
Nettement plus important	9										
Protection des infrastructures	1	3	3	4	6	7	8	8	9	32,9	
Économie locale	1/3	1	2	2	4	5	6	6	8	18,9	
Processus littoraux	1/3	1/2	1	2	4	5	6	6	8	16,5	
Changements environ. permanents	1/4	1/2	1/2	1	3	4	5	5	7	12,4	
Perturbations environ. temporaires	1/6	1/4	1/4	1/3	1	2	3	3	5	6,6	
Intégration au paysage	1/7	1/5	1/5	1/4	1/2	1	2	2	4	4,6	
Loisirs	1/8	1/6	1/6	1/5	1/3	1/2	1	2	3	3,4	
Fiabilité structurale	1/8	1/6	1/6	1/5	1/3	1/2	1/2	1	3	2,9	
Changements climatiques	1/9	1/8	1/8	1/7	1/5	1/4	1/3	1/3	1	1,7	

### Analyse comparative de la hiérarchisation des critères d'aide à la décision

L'évaluation des critères d'aide à la décision a été effectuée en fonction des priorités en matière de gestion de la zone côtière de sept municipalités de la Baie-des-Chaleurs. Les vecteurs de priorité de chacun des critères d'aide à la décision résultant de l'évaluation faite par les municipalités sont présentés à la figure 3.5.

Une divergence des priorités en matière de gestion de la zone côtière des municipalités peut facilement être observée, malgré le fait que celles-ci soient voisines. L'utilité du développement d'un outil basé sur des critères d'aide à la décision, pouvant être appliqués localement, est ici mise en évidence par les besoins singuliers des municipalités.

De plus, l'analyse comparative de la hiérarchisation des critères d'aide à la décision de différents organismes de la Baie-des-Chaleurs permet de comparer leurs objectifs en matière de gestion de la zone côtière. La figure 3.6 démontre la divergence entre les trois organismes de référence. Le contexte de la ville de Bonaventure est utilisé pour la comparaison des priorités des divers organismes.

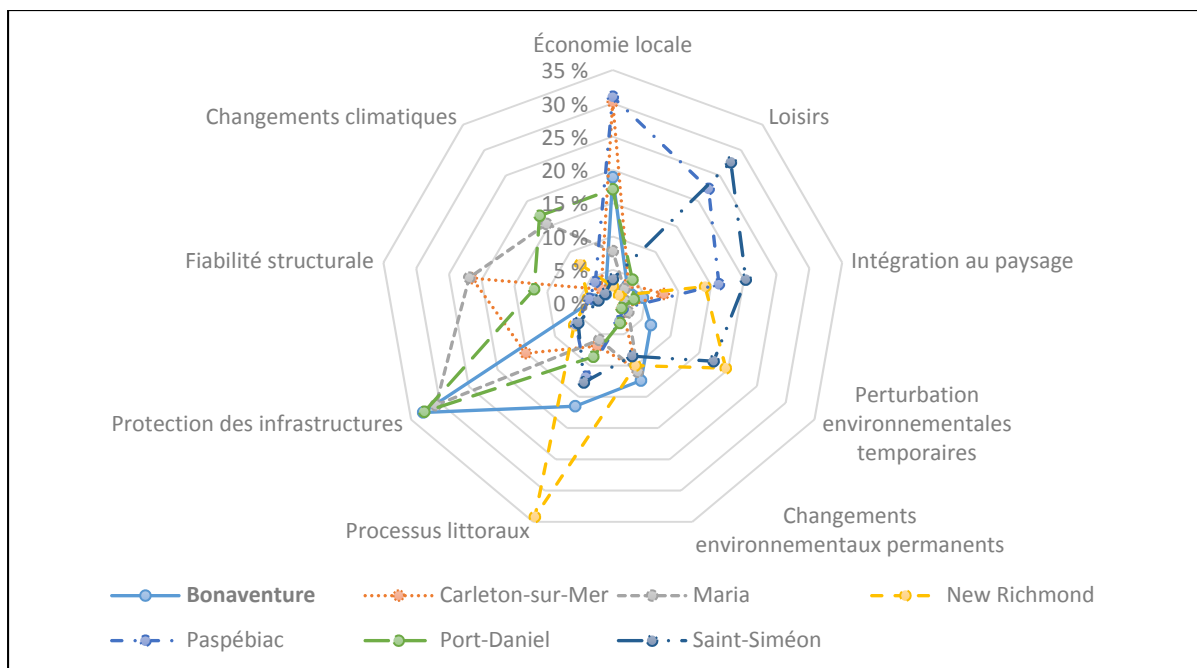


Figure 3.5 Vecteurs de priorités des critères d'aide à la décision représentant les priorités en matière de gestion de la zone côtière de sept municipalités de la Baie-des-Chaleurs en Gaspésie

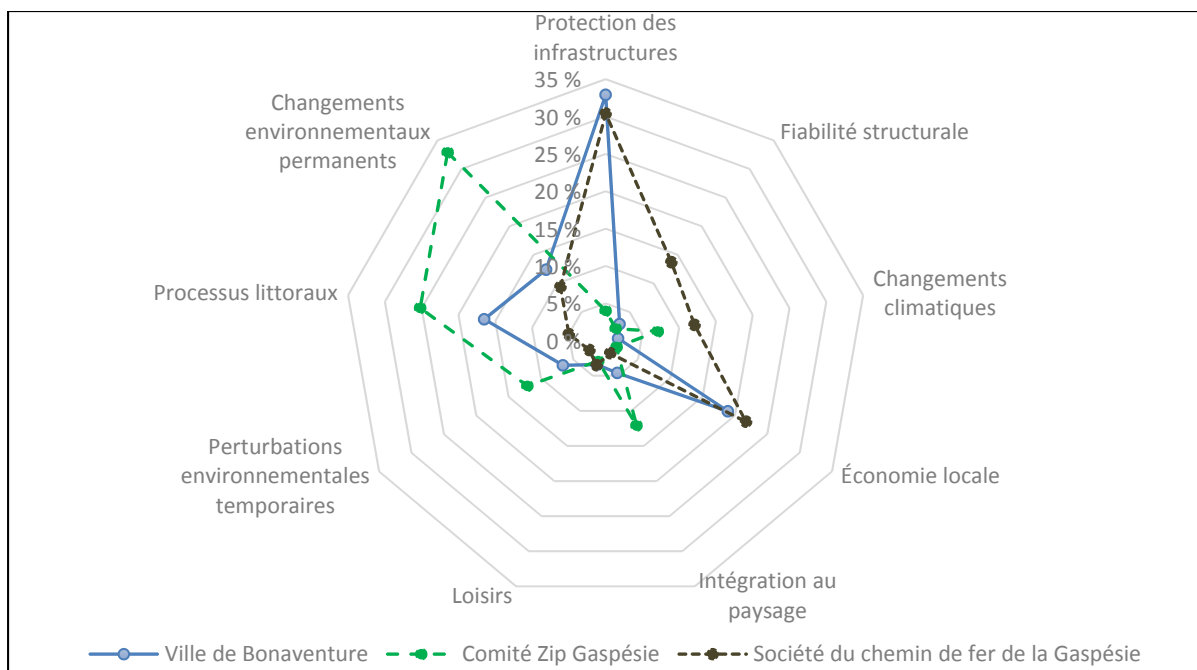


Figure 3.6 Vecteurs de priorité accordés aux critères d'aide à la décision par trois organismes de la Baie-des-Chaleurs représentant des intérêts différents

L'évaluation des critères d'aide à la décision faite par le Comité ZIP Gaspésie cadre avec la mission de l'organisme qui est d'assurer la conservation, la restauration et la mise en valeur du milieu marin et côtier gaspésien. Ainsi, les critères d'aide à la décision *Changements environnementaux permanents*, *Processus littoraux*, *Intégration au paysage*, *Perturbation environnementale temporaire* et *Changements climatiques*, principalement d'ordre environnemental, ont obtenu les vecteurs de priorités les plus élevés. Pour la SCFG, ce sont les critères d'aide à la décision *Protection des infrastructures*, *Économie locale*, *Fiabilité structurale* et *Changements climatiques*, principalement d'ordre technique, qui ont obtenu les vecteurs de priorités les plus élevés, concordant avec la volonté de l'organisme d'offrir un service fiable à ces clients. L'évaluation effectuée par la ville de Bonaventure présente un certain compromis entre les organismes comparatifs. Ce sont les critères d'aide à la décision *Protection des infrastructures*, *Économie locale* et *Processus littoraux* qui ont obtenu les vecteurs de priorités les plus élevés, une combinaison de critères d'ordre environnemental, économique et technique.

### 3.3.2 Mesures de lutte contre l'érosion côtière hiérarchisées

La hiérarchisation des mesures de lutte contre l'érosion côtière (MLCEC) repose sur les deux dernières étapes de la méthode AHP : (i) MLCEC hiérarchisées par critère d'aide à la décision; (ii) MLCEC hiérarchisées. Les résultats sont générés en fonction des données obtenues auprès de la ville de Bonaventure.

Le tableau 3.5 présente les neuf matrices de pondération menant à la hiérarchisation des MLCEC par critère d'aide à la décision. La colonne *Résultats* de chaque matrice de pondération présente le vecteur de priorité des MLCEC en fonction du critère d'aide à la décision de la matrice.

Les résultats du tableau 3.5 montrent que les MLCEC *mur de protection*, *recharge de plage* et *enrochement* sont jugées les plus performantes pour respectivement quatre, trois et deux critères d'aide à la décision.



Tableau 3.5 Matrices de pondération des mesures de lutte contre l'érosion côtière en fonction des critères d'aide à la décision

Degré de préférence	Poids	Protection des infrastructures							Économie locale								
		Recharge de plage	Brise-lame émergé	Brise-lame submergé	Enrochement	Mur de protection	Épi maritime	Rip-rap	Vecteurs de priorités (%)	Recharge de plage	Brise-lame émergé	Brise-lame submergé	Enrochement	Mur de protection	Épi maritime	Rip-rap	Vecteurs de priorités (%)
Même ordre de grandeur	1																
Légèrement plus important	3																
Plus important	5																
Beaucoup plus important	7																
Nettement plus important	9																
Recharge de plage	1	1/2	2	1/3	1/3	2	1	9,7	1	3	5	1	1	3	3	23,2	
Brise-lame émergé	2	1	3	1/2	1/2	2	2	15,5	1/3	1	3	1/3	1/3	1	1	8,5	
Brise-lame submergé	1/2	1/3	1	1/4	1/4	1	1/2	5,7	1/5	1/3	1	1/5	1/5	1/3	1/3	3,7	
Enrochement	3	2	4	1	1	4	3	26,7	1	3	5	1	1	3	3	23,2	
Mur de protection	3	2	4	1	1	4	3	26,7	1	3	5	1	1	3	3	32,2	
Épi maritime	1/2	1/2	1	1/4	1/4	1	1/2	6,0	1/3	1	3	1/3	1/3	1	3	10,5	
Rip-rap	1	1/2	2	1/3	1/3	2	1	9,7	1/3	1	3	1/3	1/3	1/3	1	7,7	
		Processus littoraux							Changements environnementaux								
Recharge de plage	1	5	3	8	9	6	4	40,5	1	4	3	7	7	1/2	6	26,8	
Brise-lame émergé	1/5	1	1/3	4	5	2	1/2	10,2	1/4	1	1/2	4	4	1/5	3	10,0	
Brise-lame submergé	1/3	3	1	6	7	4	2	21,4	1/3	2	1	5	5	1/4	4	14,2	
Enrochement	1/8	1/4	1/6	1	2	1/3	1/5	3,6	1/7	1/4	1/5	1	1	1/8	1/2	3,2	
Mur de protection	1/9	1/5	1/7	1/2	1	1/4	1/6	2,5	1/7	1/4	1/5	1	1	1/8	1/2	3,2	
Épi maritime	1/6	1/2	1/4	3	4	1	1/3	7,0	2	5	4	8	8	1	7	37,7	
Rip-rap	1/4	2	1/2	5	6	3	1	14,8	1/6	1/3	1/4	2	2	1/7	1	4,9	
		Perturbations environ. temporaires							Intégration au paysage								
Recharge de plage	1	1/3	1/7	1/7	1/7	1/5	1/5	2,6	1	8	1/2	6	5	3	6	27,2	
Brise-lame émergé	3	1	1/5	1/5	1/5	1/3	1/3	4,8	1/8	1	1/9	1/3	1/4	1/6	1/3	2,5	
Brise-lame submergé	7	5	1	1	1	3	3	24,2	2	9	1	7	6	4	7	38,1	
Enrochement	7	5	1	1	1	3	3	24,2	1/6	3	1/7	1	1/2	1/4	1	4,9	
Mur de protection	7	5	1	1	1	3	3	24,2	1/5	4	1/6	2	1	1/3	2	7,5	
Épi maritime	5	3	1/3	1/3	1/3	1	1	10,0	1/3	6	1/4	4	3	1	4	14,8	
Rip-rap	5	3	1/3	1/3	1/3	1	1	10,0	1/6	3	1/7	1	1/2	1/4	1	4,9	
		Loisirs							Fiabilité structurale								
Recharge de plage	1	5	3	7	6	4	9	40,3	1	1/4	1/8	1/6	1/9	1/7	1/6	2,2	
Brise-lame émergé	1/5	1	1/3	3	2	1/2	5	9,9	4	1	1/5	1/3	1/6	1/4	1/3	4,9	
Brise-lame submergé	1/3	3	1	5	4	1/2	7	18,3	8	5	1	3	1/2	2	3	23,1	
Enrochement	1/7	1/3	1/5	1	1/2	1/4	3	4,6	6	3	1/3	1	1/4	1/2	1	9,9	
Mur de protection	1/6	1/2	1/4	2	1	1/3	4	6,7	9	6	2	4	1	3	4	34,3	
Épi maritime	1/4	2	2	4	3	1	6	17,8	7	4	1/2	2	1/3	1	1/2	13,2	
Rip-rap	1/9	1/5	1/7	1/3	1/4	1/6	1	2,4	6	3	1/3	1	1/4	2	1	12,3	
		Changement climatiques															
Recharge de plage	1	3	8	7	7	3	2	34,7									
Brise-lame émergé	1/3	1	6	5	5	1	1/2	15,5									
Brise-lame submergé	1/8	1/6	1	1/2	1/2	1/6	1/7	2,8									
Enrochement	1/7	1/5	2	1	1	1/5	1/6	4,1									
Mur de protection	1/7	1/5	2	1	1	1/5	1/6	4,1									
Épi maritime	1/3	1	6	5	5	1	1/2	15,5									
Rip-rap	1/2	2	7	6	6	2	1	23,4									

Le tableau 3.6 présente les MLCEC hiérarchisées avec la méthode AHP. Les MLCEC hiérarchisées sont présentées dans la première section du tableau et leur pourcentage final respectif est indiqué dans la seconde section. La synthèse de la pondération des critères d'aide à la décision et des MLCEC est présentée dans la troisième section du tableau. La partie supérieure de la troisième section présente les critères d'aide à la décision en ordre décroissant en fonction de leur vecteur de priorité, alors que la partie inférieure présente les vecteurs de priorité décernés à chaque MLCEC par critère d'aide à la décision en titre de colonne.

Tableau 3.6 Synthèse des résultats de l'itération initiale de l'analyse multicritère AHP en fonction des priorités en matière de gestion de la zone côtière de la ville de Bonaventure

Classement	MLCEC		Synthèse de la pondération								
	Position		Pourcentage final								
			(%)								
	1 Recharge de plage		32,9	18,9	16,5	12,4	6,6	4,6	3,4	2,9	1,7
	2 Mur de protection		Protection des infrastructures	Économie locale	Processus littoraux	Chang. env. permanents	Perturb. env. temp.	Intégration au paysage	Loisirs	Fiabilité structurelle	Changements climatiques
	3 Enrochement		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
	4 Brise-lame submergé		9,7	23,2	40,5	26,8	2,6	27,2	40,3	2,2	34,7
	5 Épi maritime		26,7	23,2	2,5	3,2	24,2	7,5	6,7	34,3	4,1
	6 Brise-lame émergé		26,7	23,2	3,6	3,2	24,2	4,9	4,6	9,9	4,1
	7 Rip-rap		5,7	3,7	21,4	14,2	24,2	38,1	18,3	23,1	2,8

Sur la base des résultats du tableau 3.6, la MLCEC *recharge de plage* se classe en première position selon l'évaluation des critères d'aide à la décision réalisée par les représentants de la ville de Bonaventure. Un écart de 3,9 % sépare cette MLCEC du pourcentage obtenu par le mur de protection, alors que l'écart-type est de 4,1 %. La hiérarchisation des MLCEC effectuée par l'ensemble des organismes consultés est présentée à l'annexe IV.

### Analyse comparative des mesures de lutte contre l'érosion côtière hiérarchisées

Les pourcentages finaux des MLCEC en fonction des priorités des trois organismes de la Baie-des-Chaleurs sont présentés à la figure 3.7. L'analyse comparative des MLCEC hiérarchisées permet de comparer les résultats entre plusieurs organisations d'un même milieu.

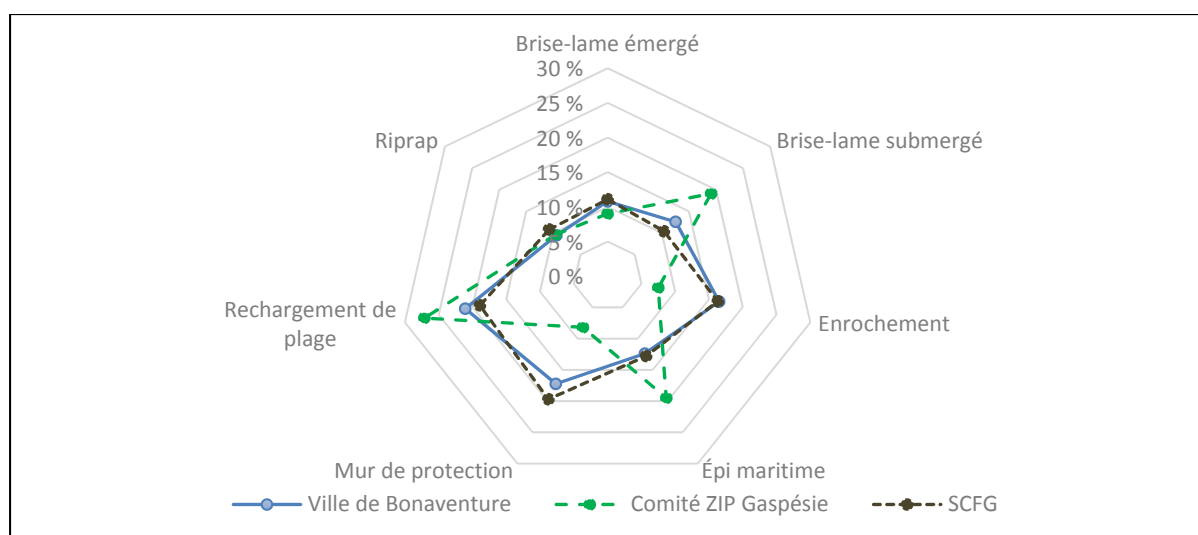


Figure 3.7 Pourcentages finaux des mesures de lutte contre l'érosion côtière selon les priorités en matière de gestion de la zone côtière de trois organismes de la Baie-des-Chaleurs représentant des priorités différentes

Le classement final diffère en fonction des priorités de la ville de Bonaventure, du Comité ZIP Gaspésie et de la SCFG. Sur la figure 3.8, deux profils de courbes peuvent être distingués. La ville de Bonaventure et la SCFG présentent des profils de courbes similaires, alors que celui du Comité ZIP Gaspésie se différencie. La recharge de plage se distingue par rapport aux autres techniques d'intervention avec des pourcentages finaux se situant entre 18,9 et 27,1. Une seconde itération permettrait de raffiner les MLCEC.

### 3.3.3 Itérations subséquentes

Sur la base des résultats initiaux et de la distinction du profil de courbe du Comité ZIP, une seconde itération de la démarche de sélection est jugée nécessaire afin d'adapter les mesures de lutte contre l'érosion côtière (MLCEC) aux réalités locales. Une seconde itération

nécessite la révision des trois étapes du processus décisionnel : (i) une redéfinition de la liste des MLCEC; (ii) évaluation de la faisabilité technique des MLCEC redéfinies; (iii) hiérarchisation des MLCEC redéfinies.

### **Redéfinition de la liste des mesures de lutte contre l'érosion côtière**

La redéfinition de la liste des techniques d'intervention repose sur l'analyse comparative des MLCEC hiérarchisées réalisée à la section 3.3.2, ainsi que sur les classements non uniformes qu'obtiennent les MLCEC par rapport aux critères. En s'appuyant sur les résultats, les MLCEC sont évaluées comme étant principales ou complémentaires.

Les MLCEC *Enrochement*, *Mur de protection* et *Recharge de plage* ont été retenues comme MLCEC primaire. Les MLCEC *épi maritime* et *brise-lame submergé* ont été retenues en tant que MLCEC complémentaire en raison du potentiel qu'ils ont pour améliorer les MLCEC primaire. Les MLCEC *riprap* et *brise-lame émergé* n'ont pas été retenues pour la seconde itération en raison de leur faible pourcentage final obtenu auprès des trois organismes.

Les MLCEC primaires ont donc été analysées afin d'évaluer les critères à améliorer (tableau 3.7) et d'ainsi déterminer le potentiel de combinaison avec les MLCEC complémentaire. Les points à amélioration des MLCEC correspondent aux critères ayant obtenu un vecteur de priorité inférieur ou égal à 5 %.

Tableau 3.7 Points à améliorer des mesures de lutte contre l'érosion côtière retenues en prévision de la seconde itération

<b>Mesures de lutte contre l'érosion côtière</b>		<b>Points à améliorer</b>
Enrochement	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Processus littoraux</li> <li>• Changements environnementaux permanents</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intégration aux paysages</li> <li>• Changements climatiques</li> <li>• Loisirs</li> </ul>
Recharge de plage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perturbations environnementales temporaires</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fiabilité structurale</li> </ul>
Mur de protection	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Processus littoraux</li> <li>• Changements climatiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Changements environnementaux permanents</li> </ul>

Le tableau 3.8 présente les MLCEC redéfinies, élaborées en fonction des MLCEC retenues et les MLCEC complémentaires. Les MLCEC principales, conservées de façon unitaire, sont identifiées en gris. Elles servent de référence et permettent de supporter l'analyse finale.

Tableau 3.8 Liste des mesures de lutte contre l'érosion côtière redéfinies et sélectionnées pour la seconde itération

• Enrochement	• Recharge de plage
• Enrochement + recharge de plage	• Recharge de plage + brise-lame submergé
• Mur de protection	• Recharge de plage + épis maritimes
• Mur de protection + recharge de plage	

### Évaluation de la faisabilité technique de la seconde itération

L'analyse technique des MLCEC sélectionnées pour la deuxième itération s'est effectuée en fonction des mêmes bases que l'évaluation de la faisabilité technique initiale, présentée à la section 3.2.2. Toutes les MLCEC présentées au tableau 3.8 sont jugées faisables techniquement dans le cadre d'une conception préliminaire, car ils impliquent tous une MLCEC validée lors de la première itération.

### Hiérarchisation des mesures de lutte contre l'érosion côtière de la seconde itération

La hiérarchisation des MLCEC de la seconde itération repose sur la pondération des critères d'aide à la décision initiale. Toutefois, la pondération des MLCEC diffère de la première itération, car les MLCEC comparées ne sont pas les mêmes. La pondération des MLCEC effectuée pour cette seconde analyse est présentée au tableau 3.9.

Les résultats du tableau 3.9 montrent que les MLCEC *mur de protection* et *recharge de plage* sont jugées les plus performantes pour respectivement deux et trois critères d'aide à la décision comparativement à quatre et à trois à l'itération précédente. Les résultats de l'évaluation pour le critère *Protection des infrastructures* se situent entre 10,3 % et 17,6 % soit un écart-type de 2,6 %. Le tableau 3.10 présente la hiérarchisation des MLCEC de la seconde itération.

Tableau 3.9 Matrice d'évaluation des mesures de lutte contre l'érosion côtière de la deuxième itération selon les critères d'aide à la décision

Degré de préférence	Poids	Protection des infrastructures							Économie locale								
		Recharge de plage	Recharge de plage + épis maritimes	Recharge de plage + brise-lame submergé	Mur de protection	Mur de protection + recharge de plage	Enrochement	Enrochement + recharge de plage	Résultats (%)	Recharge de plage	Recharge de plage + épis maritimes	Recharge de plage + brise-lame submergé	Mur de protection	Mur de protection + recharge de plage	Enrochement	Enrochement + recharge de plage	Résultats (%)
Même ordre de grandeur	1																
Légèrement plus important	3																
Plus important	5																
Beaucoup plus important	7																
Nettement plus important	9																
Recharge de plage	1	3	4	8	5	7	4	15,1	1	1/3	1/5	1	1/3	1	1/3	1	5,9
Recharge de plage + épis maritimes	1/3	1	2	6	3	5	2	14,4	3	1	1/3	3	1	3	1	1	16,3
Recharge de plage + brise-lame sub.	1/4	1/2	1	5	2	4	1	15,8	1	3	1	5	3	5	3	3	33,4
Mur de protection	1/8	1/6	1/5	1	1/4	1/2	1/5	10,3	3	1/3	1/5	1	1/3	1	1/3	1	8,1
Mur de protection + recharge de plage	1/5	1/3	1/2	4	1	3	1/2	15,4	1	1	1/3	3	1	3	1	1	14,1
Enrochement	1/7	1/5	1/4	2	1/3	1	1/4	11,4	1	1/3	1/5	1	1/3	1	1/3	1	5,9
Enrochement + recharge de plage	1/4	1/2	1	5	2	4	1	17,6	3	1	1/3	3	1	3	1	1	16,3
		Processus littoraux							Changements environnementaux								
Recharge de plage	1	3	4	8	5	7	4	39,5	1	1/2	3	7	5	7	5	5	27,1
Recharge de plage + épis maritimes	1/3	1	2	6	3	5	2	19,8	2	1	4	8	6	8	6	6	38,0
Recharge de plage + brise-lame sub.	1/4	1/2	1	5	2	4	1	12,7	1/3	1/4	1	5	3	5	3	3	14,5
Mur de protection	1/8	1/6	1/5	1	1/4	1/2	1/5	2,8	1/7	1/8	1/5	1	1/3	1	1/3	1	3,2
Mur de protection + recharge de plage	1/5	1/3	1/2	4	1	3	1/2	8,3	1/5	1/6	1/3	3	1	3	1	1	7,0
Enrochement	1/7	1/5	1/4	2	1/3	1	1/4	4,0	1/7	1/8	1/5	1	1/3	1	1/3	1	3,2
Enrochement + recharge de plage	1/4	1/2	1	5	2	4	1	12,7	1/5	1/6	1/3	3	1	3	1	1	7,0
		Perturbations environ. temporaires							Intégration au paysage								
Recharge de plage	1	1/3	1/5	1/7	1/5	1/7	1/5	2,8	1	3	1	6	5	7	6	6	32,0
Recharge de plage + épis maritimes	3	1	1/3	1/5	1/3	1/5	1/3	5,2	1/3	1	3	4	3	5	4	4	22,8
Recharge de plage + brise-lame sub.	5	3	1	1/3	1	1/3	1	11,6	1	1/3	1	6	5	7	6	6	24,9
Mur de protection	7	5	3	1	3	1	3	28,6	1/6	1/4	1/6	1	1/2	2	1	1	4,8
Mur de protection + recharge de plage	5	3	1	1/3	1	1/3	1	11,6	1/5	1/3	1/5	2	1	3	2	2	7,6
Enrochement	7	5	3	1	3	1	3	28,6	1/7	1/5	1/7	1/2	1/3	1	1/2	1	3,1
Enrochement + recharge de plage	5	3	1	1/3	1	1/3	1	11,6	1/6	1/4	1/6	1	1/2	2	1	1	4,8
		Loisirs							Fiabilité structurale								
Recharge de plage	1	3	1/2	6	1	7	3	21,1	1	1/3	1/4	1/9	1/8	1/6	1/5	1	2,4
Recharge de plage + épis maritimes	1/3	1	1/4	4	1/3	5	1	9,5	3	1	1/2	1/7	1/6	1/4	1/3	1	4,4
Recharge de plage + brise-lame sub.	2	4	1	7	2	8	4	32,6	4	2	1	1/6	1/5	1/3	1/2	1	6,4
Mur de protection	1/6	1/4	1/7	1	1/6	2	1/4	3,6	9	7	6	1	2	4	5	5	37,4
Mur de protection + recharge de plage	1	3	1/2	6	1	7	3	21,1	8	6	5	1/2	1	3	4	4	26,4
Enrochement	1/7	1/5	1/8	1/2	1/7	1	1/5	2,6	6	4	3	1/4	1/3	1	2	2	13,7
Enrochement + recharge de plage	1/3	1	1/4	4	1/3	5	1	9,5	5	3	2	1/5	1/4	1/2	1	1	9,4
		Changement climatiques															
Recharge de plage	1	2	4	7	5	7	5	37,2									
Recharge de plage + épis maritimes	1/2	1	3	6	4	6	4	26,1									
Recharge de plage + brise-lame sub.	1/4	1/3	1	4	2	4	2	12,9									
Mur de protection	1/7	1/6	1/4	1	1/3	1	1/3	3,62									
Mur de protection + recharge de plage	1/5	1/4	1/2	3	1	3	1	8,3									
Enrochement	1/7	1/6	1/4	1	1/3	1	1/3	3,6									
Enrochement + recharge de plage	1/5	1/4	1/2	3	1	3	1	8,3									

Tableau 3.10 Synthèse des résultats de la seconde itération de l'analyse multicritère AHP selon les priorités en matière de gestion de la zone côtière de la ville de Bonaventure

Classement	MLCEC		Pourcentage final (%)	Synthèse de la pondération									
	Position			32,9	18,9	16,5	12,4	6,6	4,6	3,4	2,9	1,7	
				Protection des infrastructures	Économie locale	Processus littoraux	Changements environnement	Perturbations environnement	Intégration au paysage	Loisirs	Fiabilité structurale	Changements climatiques	
				(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
	1	Enrochement + recharge de plage		17,6	29,9	16,3	12,7	7,0	11,6	4,8	9,5	9,4	8,3
	2	Recharge de plage + brise-lame submergé		15,8	6,5	33,4	12,7	14,5	11,6	24,9	32,6	6,4	12,9
	3	Mur de protection + recharge de plage		15,4	23,6	14,1	8,3	7,0	11,6	7,6	21,1	26,4	8,3
	4	Recharge de plage		15,1	3,1	5,9	39,5	27,1	2,8	32,0	21,1	2,4	37,2
	5	Recharge de plage + épis maritimes		14,4	3,1	16,3	19,8	38,0	5,2	22,8	9,5	4,4	26,1
	6	Enrochement		11,4	20,2	5,9	4,0	3,2	28,6	3,1	2,6	13,7	3,6
	7	Mur de protection		10,3	13,7	8,1	2,8	3,2	28,6	4,8	3,6	37,4	3,6

Sur la base des résultats du tableau 3.10, la MLCEC *Enrochement + recharge de plage* se classe en première position selon l'évaluation des critères d'aide à la décision réalisée par les représentants de la ville de Bonaventure. Un écart de 1,8 % sépare cette MLCEC du pourcentage final obtenu par le mur de protection, alors que l'écart-type est de 2,6 % comparativement à un écart-type de 4,1 % pour l'itération initiale. L'utilité de la combinaison des MLCEC est donc montrée par la réduction de l'écart séparant la pondération des techniques d'intervention.

### Analyse comparative des mesures de lutte contre l'érosion côtière hiérarchisées

La figure 3.8 présente les pourcentages finaux de la deuxième itération en fonction des trois organismes de la Baie-des-Chaleurs de référence. La similitude des profils de courbe représentant les résultats de la ville de Bonaventure et de la SCFG observées à la figure 3.7 est de nouveau observée sur la figure 3.8, alors que le profil de courbe du Comité ZIP Gaspésie se différencie une fois de plus.

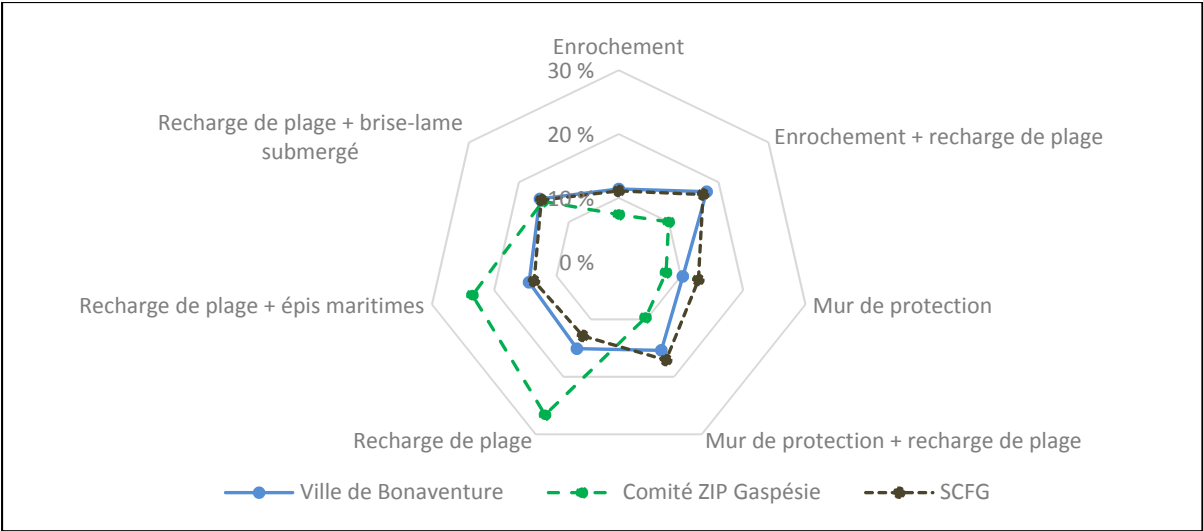


Figure 3.8 Pourcentages finaux de la seconde itération des mesures de lutte contre l'érosion côtière en fonction des priorités en matière de gestion de la zone côtière de trois organismes de la Baie-des-Chaleurs représentant des priorités différents.

L'analyse des pourcentages finaux de la seconde itération permet d'éliminer deux MLCEC : *Enrochement* et *Mur de protection*. Ces deux MLCEC sont éliminées, car aucune des évaluations réalisées en fonction des priorités en matière de gestion de la zone côtière des trois organismes de référence n'a passé le seuil de 15 %. Le tableau 3.11 présente les MLCEC retenues pour la conclusion du processus décisionnel, soit la présentation aux décideurs de l'analyse comparative en vue de la sélection d'une solution d'intervention. Les MLCEC ont été normalisées sur 1 et sont classées en fonction de la hiérarchisation des critères d'aide à la décision des trois organismes de référence de la Baie-des-Chaleurs.

Tableau 3.11 Classement des MLCEC retenues pour l'étape de sélection d'une solution d'intervention, selon la hiérarchisation des critères d'aide à la décision des trois organismes de référence de la Baie-des-Chaleurs

Mesures de lutte contre l'érosion côtière	Ville de Bonaventure		Comité ZIP Gaspésie		SCFG	
Recharge de plage	3	24,2 %	1	38,1 %	4	21,3 %
Enrochement + recharge de plage	1	28,2 %	3	14,3 %	2	27,9 %
Mur de protection + recharge de plage	2	24,6 %	4	13,9 %	1	28,3 %
Recharge de plage + épis maritimes	4	23,0 %	2	33,7 %	3	22,5 %



Le classement présenté au tableau 3.11 est une des trois finalités de la démarche proposée utilisées pour effectuer des recommandations aux décideurs. Les deux autres finalités sont liées à l'aspect financier.

### 3.3.4 Intégration de l'aspect financier

L'aspect financier est intégré à la démarche proposée d'abord par une estimation des coûts des mesures de lutte à l'érosion côtière (MLCEC) retenues répondant aux attentes des acteurs impliqués, puis en classant les MLCEC sur la base d'un indicateur d'efficience. Ces deux classements sont deux des trois finalités de la démarche proposée.

#### Estimation des coûts

Le tableau 3.12 présente l'estimation des coûts des MLCEC retenues pour le processus de recommandation aux décideurs. Les coûts sont estimés à titre indicatif afin de démontrer le potentiel de la démarche proposée dans le cadre de l'étude de cas. Les colonnes *Ratio* représentent le coût d'une MLCEC sur le coût médian de la MLCEC le plus élevé. Le coût de la MLCEC *Recharge de plage* indiqué est la moyenne de deux coûts estimés disponibles (3 200 000 \$ et 7 690 000 \$).

Tableau 3.12 Estimation des coûts des mesures de lutte contre l'érosion côtière retenues

Mesures de lutte contre l'érosion côtière	Coût	Ratio
Recharge de plage	5 445 000 \$	0,29
Enrochement + recharge de plage	4 660 000 \$	0,25
Mur de protection + recharge de plage	4 970 000 \$	0,26
Recharge de plage + épis maritimes	18 750 000 \$	1,00

#### Indicateur d'efficience

La hiérarchisation des MLCEC, selon une analyse multicritère technico-environnementale et socio-économique, permet d'établir un indicateur d'efficience qui est un ratio performance / coûts. Cet indicateur est obtenu en divisant la pondération normalisée des MLCEC (tableau 3.11) par le ratio d'estimation des coûts (tableau 3.12). L'indicateur

d'efficacité est évalué pour chacune des MLCEC hiérarchisées pour les trois organismes de la Baie-des-Chaleurs (tableau 3.13).

Tableau 3.13 Classement des mesures de lutte contre l'érosion côtière en fonction de l'indicateur d'efficacité établi avec les coûts médians

Mesures de lutte contre l'érosion côtière	Ville de Bonaventure		Comité ZIP Gaspésie		SCFG	
Recharge de plage	0,83	3	1,31	1	0,73	3
Enrochement + recharge de plage	1,13	1	0,58	2	1,12	1
Mur de protection + recharge de plage	0,93	2	0,52	3	1,07	2
Recharge de plage + épis maritimes	0,23	4	0,34	4	0,22	4

Le tableau 3.13 montre que seul le classement de la SCFG est modifié à la suite de l'application de l'indicateur d'efficacité. De plus, l'indicateur d'efficacité montre que les classements de la ville de Bonaventure et de la SCFG sont équivalents.

Sur la base des résultats obtenus dans le présent chapitre, une synthèse et une analyse de la démarche proposée sont réalisées au chapitre 4.

## **CHAPITRE 4**

### **DISCUSSION**

Ce chapitre porte sur la pertinence de la démarche proposée pour l'évaluation de mesures de lutte contre l'érosion côtière. Le premier sous-chapitre aborde les retombées de la démarche proposée alors que le deuxième sous-chapitre est consacré à une analyse de sensibilité de la démarche. Les perspectives de l'utilisation de la démarche dans le contexte québécois sont présentées dans le dernier sous-chapitre.

#### **4.1 Retombées de la démarche proposée**

Les processus technique et décisionnel, décrits au chapitre 2 et mis en application au chapitre 3, sont deux volets autonomes pouvant être appliqués de façon indépendante. Toutefois, la complémentarité des deux volets est bénéfique pour analyser une problématique d'érosion côtière de façon systémique. Une approche intégrée, utilisée par une organisation de professionnels, a le potentiel d'améliorer le processus de sélection d'une mesure de lutte contre l'érosion côtière (MLCEC). La démarche collective et le flux d'informations amenés dans le processus de sélection permettent d'inclure la collectivité dès le début du processus de sélection d'une MLCEC.

La figure 4.1 présente, sous forme d'un schéma logique, la proposition de méthode d'évaluation de MLCEC. Sur la base des résultats présentés au chapitre 3, cette figure fait la synthèse de la démarche en montrant les sources de données utilisées, les intrants et les extrants ainsi que les procédures utilisées dans chacune des étapes de la démarche d'évaluation.

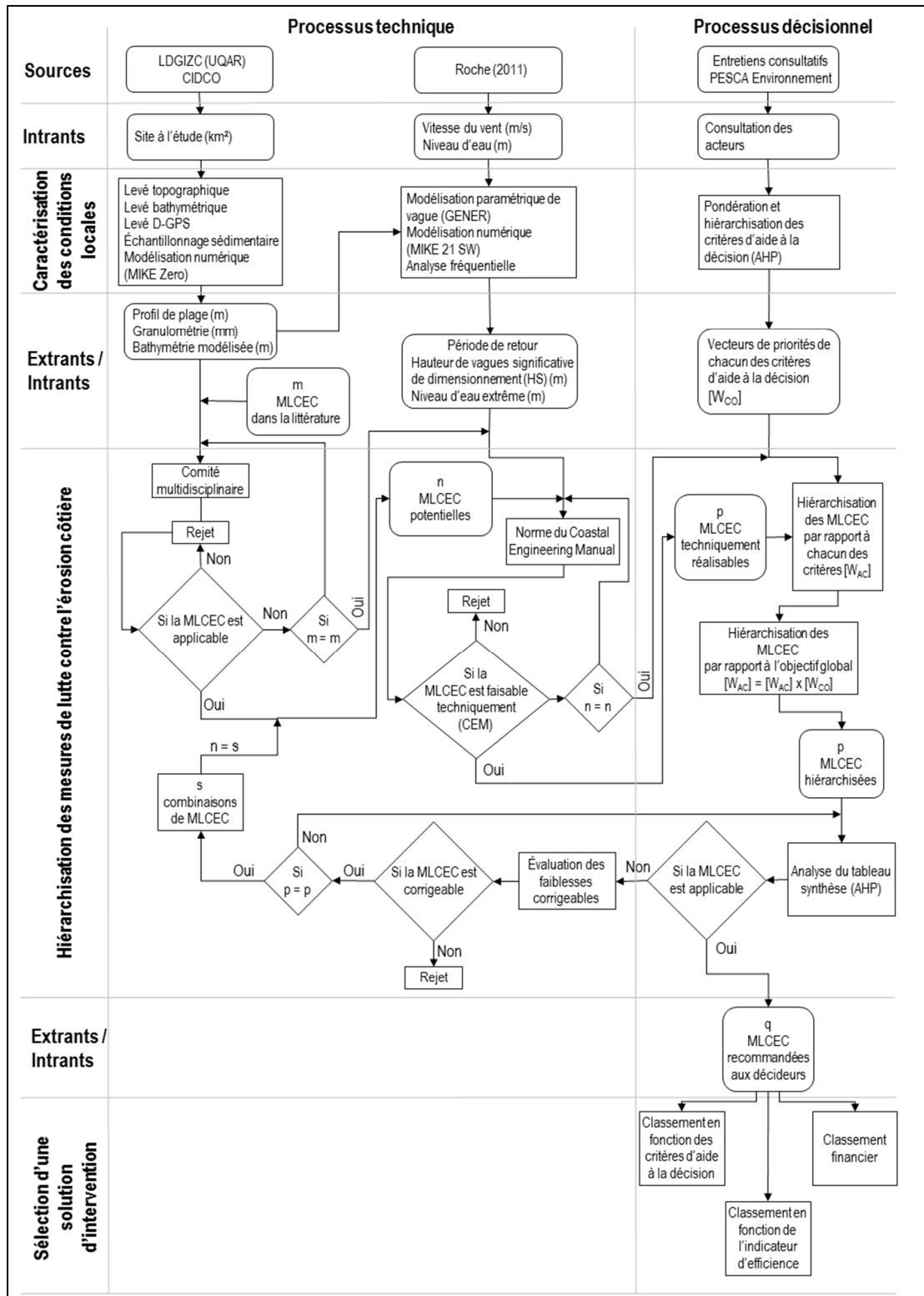


Figure 4.1 Schéma logique de la démarche proposée pour l'évaluation de mesures de lutte contre l'érosion côtière

La démarche proposée combine la caractérisation de la dynamique hydrosédimentaire et la hiérarchisation des MLCEC par les acteurs locaux pour évaluer les composantes du système côtier et aménager des MLCEC adaptées au milieu. La caractérisation de la dynamique hydrosédimentaire procure les bases de calcul pour sélectionner des MLCEC adaptées aux conditions hydrosédimentaires locales alors que la hiérarchisation des MLCEC formalise le processus décisionnel en fonction des besoins des acteurs.

La démarche collective, l'idée même de la gestion intégrée du Saint-Laurent (GISL), est préconisée et pertinente pour les divers acteurs impliqués dans un projet relatif à l'érosion côtière. L'utilisation de la méthode AHP facilite la discussion en regard d'une terminologie commune et offre une plateforme de communication permettant de structurer le processus d'aide à la décision. Les acteurs peuvent ainsi exprimer leurs besoins et leurs attentes en matière de gestion de la zone côtière et de les refléter sur la pondération des MLCEC.

Un flux d'information est mis à la disposition des acteurs concernés par la démarche proposée sur les caractéristiques du système côtier, sur les caractéristiques des MLCEC ainsi que sur les variables environnementales et socio-économiques, dont les résultats peuvent être utilisés sous différentes formes. D'abord, les résultats sont présentés en fonction de chacun des critères d'aide à la prise de décision, permettant d'identifier les forces et les faiblesses des MLCEC. La compréhension des effets des MLCEC sur le système côtier est ainsi facilitée et les divergences entre les scénarios d'intervention peuvent être expliquées. Cette information peut donc être utilisée pour fournir davantage de renseignements aux décideurs ainsi qu'aux acteurs. Également, elle permet de justifier l'ajout d'une MLCEC complémentaire afin de combler les lacunes d'une solution d'intervention principale. De plus, la démarche collective et la maîtrise de l'ensemble des interactions du système côtier permettent à l'organisation de professionnels utilisant la démarche de se démarquer pour l'obtention de contrats.

La démarche proposée permet donc aux décideurs de maîtriser l'information rendue disponible et de prendre une décision éclairée en fonction de l'opinion des divers acteurs

concernés. Aussi, elle offre la possibilité aux décideurs et aux acteurs de toutes parts d'être mieux renseigné sur la gestion des risques côtiers sous les aspects environnementaux, socio-économiques et techniques.

Aussi, l'utilisation d'un classement financier distinct permet à l'organisation de présenter les résultats aux décideurs en dissociant l'aspect financier des aspects environnementaux, socio-économiques et techniques. Cette distinction pousse la réflexion des décideurs au-delà de l'aspect financier, leur permettant de prendre en considération les divers facteurs influençant le milieu à étude.

#### **4.2 Analyse de la démarche proposée**

L'efficacité, l'efficience et le risque, quant au *temps* et aux *coûts* associés à un projet, sont considérés dans le choix des outils utilisés dans les processus technique et décisionnel. Ainsi, la démarche de sélection d'une mesure de lutte contre l'érosion côtière (MLCEC) est optimisée lorsque le risque sur les aspects environnementaux, socio-économiques et techniques est diminué et que l'effet sur le temps et le coût de l'étude est minimisé. Également, les facteurs financiers étant généralement à la base de la prise de décision (Jolicoeur et O'Carroll, 2007), l'effet sur le coût d'une étude réalisée par une organisation de professionnels doit être peu considérable pour qu'une modification au processus de conception existant soit acceptée et appliquée.

Sur le plan technique, la notion de risque est associée à la base de calcul et de données nécessaires à la conception de la solution d'intervention. Les rapports présentés au tableau 1.10, réalisés entre 2011 et 2014, ont été sujets à une modélisation numérique de la dynamique hydrosédimentaire. Ces rapports ont été réalisés sur des sites au potentiel économique important. Il y a une forte probabilité que d'autres interventions aient eu lieu ces dernières années sur les littoraux du Québec maritime sans avoir été sujettes à une analyse de la dynamique hydrosédimentaire. Le risque pour les milieux environnementaux côtiers n'est donc pas quantifié ou même considéré. Or, la validité technique d'une MLCEC ne peut pas

être vérifiée sans l'analyse de données sur la dynamique hydrosédimentaire du milieu. Ainsi, une mauvaise gestion technique accentue les risques pour les milieux environnementaux et socio-économiques.

Le fait de ne pas vérifier la validité technique des MLCEC pose également un risque sur le plan social, car dans un processus de bonne gouvernance, la société s'attend à des solutions efficaces. Or, l'efficacité passe par une mise en œuvre efficace du processus de sélection des MLCEC. Dans cette optique, la présélection et l'application d'une structure itérative amènent un principe d'entonnoir permettant d'éliminer les MLCEC inapplicables et de raffiner les MLCEC potentielles au fur et à mesure que la démarche de sélection progresse. Une structure itérative permet également de faciliter la pondération de l'analyse multicritère. L'efficacité du processus de consultation des acteurs et de proposition aux décideurs est ainsi accentuée.

Sur le plan décisionnel, au Québec, aucun outil d'aide à la prise de décision destinée à l'usage des organisations de professionnel n'est utilisé pour considérer les interactions entre les éléments du système côtier et de la zone côtière lors de la sélection d'une solution d'intervention (tableau 1.10). Or, la notion de risque doit être liée à ces interactions que l'outil d'aide à la prise de décision doit refléter précisément par des unités significatives. L'utilisation de la méthode AHP comme outil d'aide à la prise de décision permet d'évaluer chacun des critères en fonction de l'unité qui lui est propre et de les ramener vers une unité comparative neutre. En comparaison, l'analyse coûts-avantages utilise une unité comparative monétaire. En gestion de la zone côtière, la multiplication des hypothèses à considérer pour parvenir à assembler des critères hétéroclites vers une base commune monétaire présente un risque en soi. Dans ce cas, il est difficile de gérer le risque lié à une problématique d'érosion côtière de façon systémique sans en augmenter le risque.

La qualité totale, étant une démarche éprouvée pour la gestion du risque dans un contexte de démarche systémique et de protection environnementale (Hausler, Béron et Hade, 1994), est

pertinente à employer pour valider la démarche proposée en la décomposant selon les principes fondamentaux (tableau 4.1).

Tableau 4.1 Validation de la démarche proposée avec les principes de la qualité totale

Principes de la qualité totale	Principe atteint	Validation de la démarche proposée
Concertation	Oui	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consultation des acteurs de la zone côtière afin d'en apprendre davantage sur les interactions entre les aspects environnementaux, socio-économiques et techniques du système côtier.</li> </ul>
Proaction	Non	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aucune évaluation de l'évolution temporelle du système côtier en présence des MLCEC.</li> </ul>
Rétroaction	Oui	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simulation de la dynamique hydrosédimentaire appuyée sur des séries de données historiques afin d'effectuer la conception des MLCEC.</li> </ul>
Mise à la disposition de la collectivité	Oui	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Considération des besoins en matière de gestion de la zone côtière des intervenants du milieu lors du processus de sélection d'une solution d'intervention.</li> <li>• Information aux décideurs sur les besoins des acteurs de la zone côtière.</li> </ul>

Les exigences pour atteindre le principe de proaction n'ont pas été respectées dans le développement de la démarche proposée. Or, l'ajout d'un module numérique permettant de comparer l'évolution géomorphologique du littoral selon différentes MLCEC par rapport au statu quo est envisageable dans le futur. Un tel type de module n'a pas été considéré dans la démarche proposée en raison du manque de données nécessaires à la géolocalisation et à la représentation précise de la dynamique hydrosédimentaire.

Dans un éventuel processus d'opérationnalisation de la démarche proposée, il serait intéressant d'évaluer certains aspects afin d'optimiser sa commercialisation. D'abord, la pertinence du processus itératif serait à vérifier alors que tous les MLCEC pourraient être évaluées dès le départ. Cette modification risque toutefois d'alourdir le traitement de l'analyse multicritère. Ensuite, des scénarios d'expropriation et de non-intervention pourraient être ajoutés aux MLCEC afin de comparer tous les scénarios avec un même outil. Puis, il serait pertinent de valider l'étape de recommandation aux décideurs, particulièrement



la pertinence de l'utilisation de l'indicateur d'efficience. Cet indicateur est sensible au coût et une estimation erronée pourrait influencer négativement la sélection d'une solution d'intervention.

### **4.3 Perspectives et recommandations**

La démarche de sélection proposée s'inscrit dans l'approche de la gestion intégrée du Saint-Laurent (GISL). Ce mode de gestion de la zone côtière est recommandé par les plans d'action gouvernementaux afin d'être utilisé par les instances publiques. Ainsi, le développement d'outils de planification de l'aménagement côtier destinés aux instances publiques est financé par divers programmes gouvernementaux. La démarche proposée s'inscrit donc dans une suite d'outils mis à la disposition des décideurs afin de les aider à prendre des décisions éclairées.

Toutefois, la démarche de sélection proposée qui s'appuie sur le processus de concertation de la GISL, amène à comparer les priorités différentes de divers organismes de la zone côtière (figure 3.6). La concertation tend vers une solution consensuelle. Or, la notion de consensus doit être abordée avec prudence, car une sélection consensuelle peut être influencée par la diversité d'opinions. La décision d'intégrer ou d'exclure un acteur peut devenir un enjeu considérable pour le choix de la solution finale. Également, une décision consensuelle peut être une décision qui ne satisfait que partiellement les acteurs. Ainsi, la démarche d'aide à la décision proposée montre aux décideurs les divergences d'opinions des acteurs, en laissant place à leur jugement. Elle est donc un outil d'aide à la prise de décision et non pas un outil de décision.

Les principes de la GISL ne sont pas considérés par les firmes de services-conseils dans les rapports d'analyse de mesures de lutte contre l'érosion côtière. Or, aucun outil cadrant dans l'optique de la GISL n'est actuellement destiné à l'usage des organisations de professionnels. La démarche proposée dans ce mémoire permet donc à ces organisations d'utiliser un outil basé sur une approche systémique s'intégrant dans le processus de conception actuel.

Toutefois, l'étendue des avantages de la démarche de sélection proposée dépend de la volonté des professionnels en gestion de la zone côtière à ajouter une étape aux processus de conception d'une MLCEC.

Considérant la complexité des interactions de la zone côtière pour les aspects écologiques, hydrosédimentaires et sociaux, il est nécessaire d'utiliser une approche multidisciplinaire et systémique de gestion de la zone côtière afin d'identifier les meilleures stratégies d'adaptation aux changements climatiques pour les communautés côtières. De plus, il est important que les acteurs locaux et régionaux soient impliqués dès le départ du projet pour bien identifier leurs besoins en matière d'adaptation et s'assurer que les solutions envisagées soient en concordance non seulement avec la dynamique du milieu naturel, mais aussi du point de vue social. La discipline du génie côtier est intéressante à intégrer afin d'identifier, de concevoir et d'aménager des ouvrages de protection côtière adaptés au système côtier. Dans cette optique, l'emploi d'une approche de gestion par unité hydrosédimentaire impliquant les différents acteurs de la zone côtière permettrait de développer un outil recommandant des MLCEC à appliquer adaptées à chacun des milieux environnementaux côtiers.

Les mesures de lutte contre l'érosion côtière actuelles présentent certainement des lacunes au niveau de la gestion énergétique qui sont à considérer lors d'une intervention en milieu côtier. D'abord, il serait pertinent d'élaborer des techniques d'intervention permettant de disperser l'énergie de façon à minimiser les répercussions sur les composantes environnementales du littoral. Une conception efficiente passerait par l'identification de combinaisons de techniques d'intervention efficaces et l'utilisation de matériaux appropriés. Également, il serait intéressant de trouver des pistes de développement visant à utiliser l'énergie des vagues comme source alternative d'énergie électrique. Toutefois, certaines contraintes seraient à considérer afin d'effectuer un tel développement, entre autres la navigation, la sécurité des usagers, l'inconstance de l'énergie des vagues, la rareté des données de dynamique côtière actuelle ainsi que l'acceptabilité sociale.

Un travail de sensibilisation et de formation reste à faire auprès des décideurs et du public afin de faire accepter socialement de nouvelles solutions. L'orientation de la communication doit passer par l'effet des mesures de lutte contre l'érosion côtière sur la dynamique côtière des unités hydrosédimentaires.



## CONCLUSION

Au Québec, actuellement, l'analyse de mesures de lutte contre l'érosion côtière (MLCEC) s'appuie principalement sur des critères d'ordre technique. Dans ce contexte, l'absence d'un cadre systémique a pour effet de négliger des impacts potentiellement négatifs pour la zone côtière engendrés par l'aménagement d'une MLCEC inadéquate. Or, les impacts de l'aménagement d'une MLCEC peuvent être anticipés en considérant les interactions entre les aspects environnementaux, socio-économiques et techniques du système côtier. Alors que plusieurs outils favorisant une gestion intégrée de la zone côtière sont mis à la disposition des instances publiques, aucun outil destiné aux professionnels en gestion de la zone côtière n'a été développé. La démarche décrite dans ce mémoire vise à combler ce manque en matière de gestion de la zone côtière en permettant d'élargir l'horizon d'analyse préalablement à la sélection d'une solution d'intervention.

La méthodologie de la démarche proposée se divise en deux processus, soit technique et décisionnel, dont l'objectif est de recommander aux décideurs des solutions d'intervention adaptées à leur milieu. Le processus technique vise à sélectionner les mesures de lutte contre l'érosion côtière (MLCEC) adaptées à la dynamique hydrosédimentaire du milieu. Ainsi, sept MLCEC ont d'abord été présélectionnées, puis quatre ont été sujets à une conception préliminaire en fonction du régime de vagues (2,28 m) de la Baie de Plaisance aux Îles-de-la-Madeleine.

Le processus décisionnel vise à hiérarchiser avec la méthode AHP les MLCEC applicables identifiées dans le processus technique en fonction des priorités en matière de gestion de la zone côtière des acteurs consultés. Des représentants de neuf organismes de la Baie-des-Chaleurs ont été consultés au moyen de questionnaire et la comparaison des résultats montre la divergence des priorités en matière de gestion de la zone côtière en fonction des organismes. Une étude de cas hypothétique avec trois organismes (ville de Bonaventure, Comité ZIP Gaspésie et SCFG) montre qu'en utilisant les priorités pour hiérarchiser les MLCEC, les priorités de la ville de Bonaventure et de la SCFG sont similaires alors qu'ils


priorisent les combinaisons des MLCEC *Enrochement + recharge de plage* (28,2 %) et *Mur de protection + recharge de plage* (28,3 %) respectivement. Le Comité ZIP Gaspésie se distingue des deux autres en priorisant la recharge de plage (38,1 %). Un classement des MLCEC en fonction d'une estimation du coût est établi et un indicateur d'efficacité est calculé. La MLCEC *Enrochement + recharge de plage* est la solution identifiée par cet indicateur pour la ville de Bonaventure (1,13) et la SCFG (1,12), alors que la recharge de plage est toujours la solution favorisée par le Comité ZIP Gaspésie (1,31). Sur la base de ces trois éléments (AHP, estimation des coûts et indicateur d'efficacité), les décideurs peuvent sélectionner une solution d'intervention en ayant un portrait global de leur milieu.

L'application d'un outil d'aide à la prise de décision favorise la cohérence entre le contexte d'implantation et la recherche d'une mesure de lutte contre l'érosion côtière. Il serait maintenant intéressant d'identifier précisément les paramètres écologiques, hydrosédimentaires et sociaux influençant la sélection d'une solution d'adaptation des communautés côtières aux aléas côtiers (érosion et submersion) accentués par les changements climatiques. Il serait également pertinent d'étudier le développement de nouvelles solutions d'adaptation en mettant de l'avant le concept d'unité hydrosédimentaire.

## ANNEXE I

### FICHES DE CARACTÉRISATION DES MESURES DE LUTTE CONTRE L'ÉROSION CÔTIÈRE

Tableau-A I-1 Fiche de caractérisation des structures de renforcement de type *Mur de protection*


Structure de renforcement	Mur de protection	
	Coûts	Matériaux
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Demande un fort budget d'entretien lorsque présent dans un environnement hostile.</li> <li>• Investissement initial élevé</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Béton</li> <li>• Bois</li> <li>• Pierres</li> <li>• Palplanches</li> <li>• Gabions</li> </ul>
<b>Fonctions</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prévention de l'érosion et de la submersion de la zone côtière.</li> <li>• Protection de la zone côtière envers l'énergie des vagues.</li> <li>• Fonction de mur de soutènement.</li> <li>• Préservation du trait de côte à un endroit fixe.</li> </ul>		
<b>Informations spécifiques requises pour la conception</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Remontée de la vague</li> <li>• Topographie de l'écosystème terrestre</li> </ul>		
<b>Stratégie de conception</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Considérer le taux d'érosion annuel ainsi que l'augmentation du NMM lors du positionnement de l'ouvrage.</li> <li>• Positionner la structure de protection en fonction de la réserve sédimentaire devant celle-ci. En déterminant un emplacement éloigné du trait de côte, moins de vagues atteindront la mesure de protection et son effet sera moindre sur le profil de plage naturel.</li> <li>• Prévoir une élévation et une largeur du haut estran permettant de réduire l'affouillement afin de prévenir un renversement de la structure.</li> <li>• Prévoir une hauteur suffisante pour prévenir la submersion et un lavage des matériaux derrière la structure.</li> <li>• Concevoir la structure de protection afin qu'elle puisse résister à la pression exercée par les vagues de tempête.</li> </ul>		
<b>Vérifications spécifiques avec un modèle numérique</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variation temporelle de la largeur du haut estran.</li> <li>• Impacts sur les côtes adjacentes.</li> </ul>		

Combinaison d'ouvrages
<ul style="list-style-type: none"> <li>La combinaison d'un mur de protection et d'une recharge de plage est fréquente. Le mur de protection fixe la position du trait de côte, alors que la recharge de plage fournit une surface pour la pratique de loisirs, une réserve de sédiment permettant une certaine variation de la morphologie de la plage de même qu'une protection au mur lui-même. Aussi, le rechargement permet de réduire le nombre de vagues atteignant le mur de protection, réduisant ainsi la réflexion des vagues et l'affouillement.</li> </ul>
Précautions
<p><b>Conception</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>La vérification de l'effet de la rétention des sédiments derrière le mur de protection sur le bilan sédimentaire de la cellule côtière.</li> <li>Le déclenchement de l'effet de bout aux extrémités de la structure en raison du déficit de sédiments et de l'augmentation de la réflexivité des vagues.</li> <li>L'utilisation de matériaux corrosifs sans entretien mène à l'affaiblissement de l'ouvrage.</li> <li>L'accès à la plage est réduit par ce type de mesure de protection. Ainsi, des accès doivent être envisagés.</li> </ul> <p><b>Opération</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>L'augmentation de la réflexivité des vagues dans la zone intertidale et dans la plage sous-marine favorisant la mise en suspension des sédiments et, ultimement, l'affouillement de la rive. Le coefficient de réflexion de la vague incidente est minimalement de 0,7.</li> <li>L'augmentation du débit des courants lors de l'abaissement du profil de plage favorise le transport des sédiments.</li> <li>L'affouillement peut être accentué par un courant s'écoulant parallèlement à l'ouvrage.</li> <li>La diminution de la largeur du haut estran rend vulnérable la zone côtière face à des vagues de moindre envergure énergétique.</li> </ul>
Incertitudes
<ul style="list-style-type: none"> <li>Insertion d'interaction entre la dynamique hydrosédimentaire et les sédiments n'existant pas au préalable engendrant des incertitudes face à la réaction sédimentaire de la cellule côtière.</li> </ul>
Entretien
<ul style="list-style-type: none"> <li>Inspecter les éléments pouvant potentiellement corroder comme les palplanches ou l'armature dans le béton.</li> <li>Prévoir une élévation ainsi qu'une largeur limite pour intervenir sur le haut estran afin d'éviter l'affouillement et un contact fréquent entre les vagues et le mur.</li> </ul>
Impacts environnementaux
<p><b>Abiotique</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>La formation d'une barrière empêchant le taux d'érosion naturel et provoquant l'altération du processus hydrosédimentaire en réduisant l'apport en sédiment provenant de l'arrière-plage créant un déficit dans le bilan sédimentaire de la cellule côtière de même qu'en amputant la flexibilité saisonnière de la morphologie côtière.</li> <li>L'augmentation de la réflexivité des vagues provoque une augmentation de l'érosion devant la structure et aux extrémités en raison de l'effet de bout provenant d'une modification du mécanisme de transport sédimentaire. Le résultat est une diminution de la largeur et de la hauteur du haut estran menant, ultimement, à sa disparition.</li> </ul>



<b>Biotique</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La présence du haut estran est primordiale pour le maintien du bas estran naturel, environnement fertile pour le milieu biotique.</li> <li>• L'insertion d'un mur de protection dans l'écotone séparant les milieux terrestre et marin modifie la structure et les fonctions des deux écosystèmes.</li> <li>• Le grossissement du substrat en zone intertidale provoque un changement ou la perte d'habitat.</li> </ul>		
<b>Stratégie de gestion de la zone côtière</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Effectuer des relevés périodiques du profil de plage pour mesurer la largeur et l'élévation du haut estran.</li> </ul>		
<b>Bénéfices spécifiques</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Le mur de protection est utile le long de route ou de bâtiment présent dans l'écosystème côtier.</li> <li>• Il nécessite une faible surface pour son aménagement.</li> </ul>		
<b>Relations publiques</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Il est important de reconnaître qu'un mur de protection est conçu pour protéger la côte et non la plage.</li> <li>• Le ratio coûts/bénéfices d'un tel ouvrage demeurent contestés.</li> <li>• Il est important de faire comprendre la distinction entre l'érosion active et passive.</li> </ul>		
<b>Notes</b> <p>Les effets d'un mur de protection sur la dynamique hydrosédimentaire varient selon la dynamique hydrosédimentaire et selon les caractéristiques spécifiques à chacun des sites. Si une réserve sédimentaire est présente en face de ce type de mesure de protection, les changements morphologiques d'une plage avec un mur de protection sont similaires à ceux observés sur une plage sans mur de protection. Dans un tel cas, le mur est utile seulement en période de tempête. La connaissance de l'interaction entre la structure et la dynamique hydrosédimentaire locale peut permettre d'ajuster les critères de conception et d'économiser plusieurs milliers de dollars par kilomètre.</p>		
<b>Références</b>		
Bernatchez et Fraser (2012) Berry, Fahey et Meyers (2014) Daniel (2001) CERC (2006)	Gabriel et Terich (2005) Heerhartz et al. (2014) Jolicoeur et O'Carroll (2007) Kraus (1988)	Kraus et McDougal (1996) Sumer, Whitehouse et Tørum (2001) Van Rijn (2011)
<b>Références de conception</b>		
CERC (2006) Van Rijn (2011)		


Tableau-A I-2 Fiche de caractérisation des structures de renforcement de type *Revêtement*

Structure de renforcement	Revêtement	
	<b>Coûts</b>	<b>Matériaux</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relativement peu dispendieux</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Béton</li> <li>• Pierres</li> <li>• Enrobé bitumineux</li> <li>• Gabions</li> <li>• Végétaux</li> </ul>
<b>Fonctions</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Protection de la zone côtière par l'absorption et la dissipation de l'énergie des vagues.</li> <li>• Prévention de l'érosion et de la submersion.</li> <li>• Préservation du trait de côte à un endroit fixe.</li> </ul>		
<b>Informations spécifiques requises pour la conception</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Remontée de la vague</li> <li>• Topographie de l'écosystème terrestre</li> </ul>		
<b>Stratégie de conception</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Choisir les matériaux en fonction des conditions de dynamique hydrosédimentaire en augmentant la résistance de ceux-ci proportionnellement aux forces générées par le régime de vague.</li> <li>• Considérer le taux d'érosion annuel ainsi que l'augmentation du NMM lors du positionnement de l'ouvrage.</li> <li>• Positionner la structure de protection en fonction de la réserve sédimentaire devant celle-ci. En déterminant un emplacement éloigné du trait de côte, moins de vagues atteindront la mesure de protection et son effet sera moindre sur le profil de plage naturel.</li> <li>• Prévoir une élévation et une largeur du haut estran permettant de réduire l'affouillement.</li> <li>• Prévoir une hauteur suffisante pour prévenir la submersion et un lavage des matériaux derrière la structure.</li> <li>• Utilisation d'un géotextile et de plusieurs couches sédimentaires ayant une granulométrie croissante vers l'extérieur de l'ouvrage pour prévenir la perte de sédiments.</li> <li>• Un pourcentage de porosité adéquat permet de réduire la réflexion des vagues incidentes.</li> </ul>		
<b>Vérifications spécifiques avec un modèle numérique</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variation temporelle de la largeur du haut estran.</li> <li>• Impacts sur les côtes adjacentes.</li> </ul>		
<b>Combinaison d'ouvrages</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• La combinaison d'un revêtement et d'une recharge permet de fixer la position du trait de côte et de fournir un lieu pour la pratique de loisirs, une réserve de sédiment permettant une certaine variation de la morphologie de la plage de même qu'une protection au revêtement. Aussi, le rechargement permet de réduire le nombre de vagues atteignant le revêtement, réduisant ainsi la réflexion des vagues et l'affouillement.</li> <li>• L'ajout de végétation au sommet du revêtement permet de stabiliser cette région et d'éviter un lavage des matériaux en cas de submersion.</li> </ul>		

Précautions
<p><b>Conception</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La vérification de l'effet de la rétention des sédiments derrière le revêtement sur le bilan sédimentaire de la cellule côtière.</li> <li>• Le déclenchement de l'effet de bout aux extrémités de la mesure de protection en raison du déficit de sédiments et de l'augmentation de la réflexivité des vagues.</li> <li>• L'utilisation de matériaux corrosifs sans entretien mène à l'affaiblissement de l'ouvrage.</li> <li>• L'accès à la plage est réduit par ce type de mesure de protection. Ainsi, des accès doivent être envisagés.</li> <li>• L'agencement de la mesure de protection au paysage permet d'éviter d'en diminuer la beauté.</li> </ul> <p><b>Aménagement</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Le positionnement des matériaux selon la conception est primordial pour prévenir des dommages à la structure lors de tempêtes.</li> </ul> <p><b>Opération</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• L'augmentation de la réflexivité des vagues dans la zone intertidale et dans la plage sous-marine favorise la mise en suspension des sédiments et, ultimement, l'affouillement de la côte. Le coefficient de réflexion de la vague incidente de ce type de mesure de protection varie de 0,3 et 0,5, selon le type de matériaux.</li> <li>• L'augmentation du débit des courants lors de l'abaissement du profil de plage favorise le transport des sédiments.</li> <li>• L'affouillement peut être accentué par un courant s'écoulant parallèlement à l'ouvrage.</li> <li>• L'affaissement de la clé de protection met en péril la stabilité de l'ouvrage.</li> <li>• La diminution de la largeur du haut estran rend vulnérable la zone côtière face à des vagues de moindre envergure énergétique.</li> </ul>
Incertitudes
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Insertion d'interaction entre la dynamique hydrosédimentaire et les sédiments n'existant pas au préalable engendrant des incertitudes face à la réaction sédimentaire de la cellule côtière.</li> </ul>
Entretien
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inspecter les éléments pouvant potentiellement corroder comme les palplanches ou l'armature dans le béton.</li> <li>• Prévoir une élévation ainsi qu'une largeur limite pour intervenir sur le haut estran afin d'éviter l'affouillement et un contact fréquent entre les vagues et le revêtement.</li> </ul>
Impacts environnementaux
<p><b>Abiotique</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La formation d'une barrière empêchant le taux d'érosion naturel et provoquant l'altération du processus hydrosédimentaire en réduisant l'apport en sédiment provenant de l'arrière-plage créant un déficit dans le bilan sédimentaire de la cellule côtière de même qu'en amputant la flexibilité saisonnière de la morphologie côtière.</li> <li>• L'augmentation de la réflexivité des vagues provoque une augmentation de l'érosion devant la structure et aux extrémités en raison de l'effet de bout provenant d'une modification du mécanisme de transport sédimentaire. Le résultat est une diminution de la largeur et de la hauteur du haut estran menant, ultimement, à sa disparition.</li> </ul>

<b>Biotique</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• La présence du haut estran est primordiale pour le maintien du bas estran naturel, environnement fertile pour le milieu biotique.</li> <li>• L'insertion d'un revêtement dans l'écotone séparant les milieux terrestre et marin modifie la structure et les fonctions des deux écosystèmes.</li> <li>• Le grossissement du substrat en zone intertidale provoque un changement ou la perte d'habitat.</li> </ul>		
<b>Stratégie de gestion de la zone côtière</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Effectuer des relevés périodiques du profil de plage pour mesurer la largeur et l'élévation du haut estran.</li> </ul>		
<b>Bénéfices spécifiques</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le revêtement est utile le long de route ou de bâtiment présent dans l'écosystème côtier lorsqu'une relocalisation est impossible.</li> </ul>		
<b>Relations publiques</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Il est important de reconnaître qu'un revêtement est conçu pour protéger la côte et non la plage.</li> <li>• Il est important de faire comprendre la distinction entre l'érosion active et passive.</li> <li>• Des impacts négatifs sont possibles pour l'esthétique de la zone côtière en raison des matériaux utilisés.</li> </ul>		
<b>Notes</b>		
<p>Dans cette fiche descriptive et dans ce mémoire, le terme revêtement est utilisé pour désigner un ouvrage aménagé parallèle au trait de côte à la limite entre les écosystèmes terrestre et marin ayant un angle entre le profil de plage et une ligne verticale virtuelle. Ainsi, les enrochements sont inclus dans cette catégorie. L'utilisation d'un revêtement remonte au Moyen-Âge. Cette mesure de protection vise à protéger la zone côtière face à l'énergie des vagues. Contrairement au mur de protection, sa surface en angle et généralement poreuse permet d'absorber une partie de l'énergie des vagues incidentes et d'ainsi réduire le coefficient de réflexion. Toutefois, l'aménagement de ce type de mesure de protection nécessite une surface plus élevée qu'un mur de protection. Si une réserve sédimentaire est présente en face du revêtement, les changements morphologiques d'une plage avec un revêtement sont similaires à ceux observés sur une plage sans revêtement. Dans un tel cas, le revêtement est utile seulement en période de tempête.</p>		
<b>Références</b>		
Bernatchez et Fraser (2012) Berry, Fahey et Meyers (2014) Daniel (2001) CERC (2006)	Gabriel et Terich (2005) Heerhartz et al. (2014) Jolicoeur et O'Carroll (2007)	Kraus (1988) Kraus et McDougal (1996) Van Rijn (2011)
<b>Références de conception</b>		
CERC (2006) Van Rijn (2011)		


Tableau-A I-3 Fiche de caractérisation des structures de stabilisation de type *Épi maritime*

Structure de stabilisation		Épi maritime	
			
	<b>Coûts</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Peu dispendieux en comparaison avec les brise-lames.</li></ul>		<b>Matériaux</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Pierres</li><li>• Bois</li><li>• Béton</li><li>• Palplanches</li></ul>
<b>Fonctions</b>			
<ul style="list-style-type: none"><li>• Modification de la dynamique hydrosédimentaire afin de favoriser la sédimentation entre les épis maritimes.</li><li>• Réduction des courants littoraux responsables du transport sédimentaire.</li></ul>		<ul style="list-style-type: none"><li>• Renflement du littoral.</li><li>• Conservation d'un minimum de la largeur du haut estran afin de favoriser la pratique de loisirs.</li><li>• Déviation des courants de marée.</li></ul>	
<b>Informations spécifiques requises pour la conception</b>			
<ul style="list-style-type: none"><li>• Granulométrie</li></ul>		<ul style="list-style-type: none"><li>• Courant littoraux</li></ul>	
<b>Stratégie de conception</b>			
<ul style="list-style-type: none"><li>• Aménager une structure simple ou dans un champ d'épis maritime.</li><li>• Estimer précisément la vitesse des courants littoraux ainsi que la proportion de sédiments transportés afin d'éviter d'accentuer l'érosion sur les côtes en aval de l'ouvrage.</li><li>• Ajuster la perméabilité afin de permettre le passage d'un certain pourcentage de sédiment. Un épi maritime imperméable (perméabilité &lt; 10 %) aura pour effet de détourner les courants littoraux vers le large. Une perméabilité optimale se situe entre 30 et 40 %. Ainsi, l'ouvrage offre une légère résistance au courant en réduisant sa vitesse d'environ 50 %. Un pourcentage de perméabilité bien ajusté permet d'obtenir un trait de côte continu.</li><li>• Ajuster l'aménagement perpendiculairement au trait de côte ou avec un léger angle.</li><li>• Modifier l'extrémité afin de réduire l'énergie des vagues entre les épis maritimes et afin de prévenir la formation de courants d'arrachement dans un contexte où les côtes sont très exposées. Ainsi, un épi maritime peut prendre la forme d'un « T », d'un « L » ou d'un « Y ».</li><li>• Ajuster la longueur et l'espacement des épis maritimes en fonction de la largeur de la zone côtière. L'efficacité d'un champ d'épis maritimes en tant que mesure de protection côtière dépend fortement de ces deux facteurs.</li></ul>			
<b>Vérifications spécifiques avec un modèle numérique</b>			
<ul style="list-style-type: none"><li>• Schéma de transport des sédiments</li><li>• Impacts potentiels sur les rives adjacentes.</li></ul>		<ul style="list-style-type: none"><li>• Évolution de la morphologie côtière</li></ul>	

<b>Combinaison d'ouvrages</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utiliser en combinaison avec une recharge afin d'accentuer la durée de vie de celui-ci.</li> <li>• Utiliser en combinaison avec des brise-lames détachés dans des endroits où les sources de sédiments pour une recharge de plage sont insuffisantes afin de maintenir une largeur du haut estran permettant la pratique de loisirs.</li> <li>• Combiner un épi maritime à l'aménagement d'une dune artificiel permet de préserver l'aspect naturel de la zone côtière.</li> </ul>
<b>Précautions</b>
<p><b>Conception</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• De l'érosion peut se produire entre deux épis maritimes si l'espacement est trop élevé.</li> <li>• Une accumulation de sédiments peut se produire du côté amont et de l'érosion du côté aval de l'épi maritime.</li> <li>• Un déficit sédimentaire se produit à l'aval de la zone d'implantation en cas de mauvaise conception.</li> <li>• L'utilisation de matériaux corrosifs sans entretien mène à l'affaiblissement de l'ouvrage.</li> </ul> <p><b>Opération</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• De l'érosion peut se produire sur le pourtour de l'ouvrage en raison de la déflexion du courant longitudinal et de la direction des vagues.</li> </ul>
<b>Incertitudes</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Protège plus ou moins la zone côtière face à l'érosion et la submersion lors de tempête qui provoque une forte surcote.</li> <li>• L'espacement optimal entre deux épis maritimes est difficile à déterminer puisqu'il est fonction de la longueur des épis et du profil final désiré.</li> </ul>
<b>Entretien</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inspecter selon les recommandations du fabricant les éléments pouvant potentiellement corroder comme les palplanches ou l'armature dans le béton.</li> </ul>
<b>Impacts environnementaux</b>
<p><b>Abiotique</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Accentuation de l'érosion en aval de la zone d'implantation en raison d'un déficit sédimentaire.</li> </ul>
<b>Stratégie de gestion de la zone côtière</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Effectuer des relevés topographiques périodiques dans la zone d'implantation et en aval de celle-ci.</li> </ul>
<b>Bénéfices spécifiques</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permet d'augmenter la largeur du haut estran.</li> </ul>
<b>Relations publiques</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• L'impact visuel de l'ouvrage peut être contesté par certain en raison de l'implantation de matériaux non présents dans la zone côtière au préalable.</li> <li>• Les impacts environnementaux sont faibles.</li> </ul>

Notes	
Un épi maritime est une structure de stabilisation perpendiculaire au trait de côte servant à ralentir la dérive littoral ainsi que le transport sédimentaire y étant associé. Le trait de côte s'ajuste à la présence de l'obstruction dans le processus hydrosédimentaire.	
Références	
Daniel (2001) CERC (2006)	Vaidya, Kori et Kudale (2015) Van Rijn (2011)
Références de conception	
CERC (1984) CERC (2006)	Van Rijn (2011)

Tableau-A I-4 : Fiche de caractérisation des structures de stabilisation de type *Brise-lame*

Structure de stabilisation		Brise-lame	
		Coûts	Matériaux
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coûts d'aménagement et d'entretien élevés</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pierres</li> <li>• Béton préfabriqué</li> </ul>
Description			
<p>Plusieurs types de brise-lames sont répertoriés dans la littérature. Chacun des types se trouve ci-dessous et sera représenté dans ce document par le numéro qui le précède. Une affirmation concerne tous les types si aucun numéro ne la suit.</p> <p>1) Détaché/émergé</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Structure parallèle à la côte et protégeant une section de celle-ci en formant un écran face aux vagues incidentes.</li> </ul> <p>2) Détaché/submergé</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Structure submergée parallèle à la côte et conçue pour laisser passer une certaine proportion de l'énergie de la vague pour contrôler la sédimentation.</li> </ul> <p>3) Attaché à la côte (photo)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Structure principalement utilisée pour la protection d'infrastructures maritimes telles que des ports, des marinas et des écluses.</li> </ul>			
Fonctions			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dissipation de l'énergie des vagues au large dans le but de protéger une ou de plusieurs parties de la côte face aux vagues.</li> <li>• Augmentation de la largeur de plage afin de favoriser la pratique de loisirs (1-2).</li> <li>• Modification de la dynamique hydrosédimentaire afin de favoriser la sédimentation tout en ayant peu d'impact sur la dérive littorale (1-2).</li> <li>• Protection des infrastructures maritimes (3).</li> </ul>			
Informations spécifiques requises pour la conception			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Échantillons granulométriques sur la largeur de la plage.</li> </ul>			




<b>Stratégie de conception</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Considérer les conditions de marée, incluant les facteurs de surcote.</li> <li>• Prévoir une baisse du niveau de la structure, en particulier durant les premières années, en raison des tassements qui se produisent dans le sol sous la structure.</li> <li>• Tenir compte du facteur de réflexion de la vague incidente qui a un effet direct sur la profondeur d'affouillement à la base de la structure. Plus il sera faible, moins l'affouillement sera important. Un supplément de matériaux peut être ajouté à la base de l'ouvrage pour prévenir l'affouillement.</li> <li>• Choisir une porosité convenable afin d'éviter un mouvement des matériaux.</li> <li>• Utiliser un géotextile entre les couches de matériaux grossiers et fins afin d'éviter la perte des matériaux de ces derniers.</li> <li>• Utiliser, en fonction du cas, des structures simples ou segmentées (1-2).</li> <li>• Prendre des dispositions afin de réduire les inconvénients et les dangers pour les nageurs et les embarcations de plaisance (1-2).</li> <li>• Prévoir un taux de rétention des sédiments n'affectant pas les côtes adjacentes (1-2).</li> <li>• Ajuster la géométrie de la structure afin de contrôler l'effet de filtrage des vagues qui sont dépendantes du niveau moyen des mers (1-2).</li> <li>• Ajuster la largeur de la crête en fonction du régime de vague (1-3).</li> </ul>	
<b>Vérifications spécifiques avec un modèle numérique</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Présence d'affouillement</li> <li>• Schéma de transport des sédiments</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Effets occasionnés par la réflexion des vagues.</li> </ul>
<b>Combinaison d'ouvrages</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• L'ajout de brise-lames submergés permet d'accroître la durée de vie de la recharge de plage (2).</li> <li>• L'ajout de brise-lames submergés afin de servir d'appuis à la pointe d'épis maritimes permet d'augmenter leur performance à certains endroits (2).</li> </ul>	

Précautions
<p><b>Conception</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Le surdimensionnement la couche supérieure mène à une réduction de la stabilité de la structure.</li> <li>• La submersion de la structure en raison d'une surcote diminue l'efficacité de la structure (1).</li> <li>• Une mauvaise conception peut provoquer davantage d'effets sédimentaires non désirés et une accentuation de l'érosion (1-2).</li> <li>• Une mauvaise conception mène à une rétention de sédiment insuffisante, à de l'érosion entre les structures (ouvrage à structure multiple) et à des impacts écologiques non désirables et imprévus (1-2).</li> <li>• Les structures submergées sont plus ou moins efficaces en période de tempête en raison de la surcote (2).</li> </ul> <p><b>Opération</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Les défaillances potentielles sont le déplacement des pierres de la couche supérieure et de la clé de protection ainsi que l'affaissement de la structure due à la perte de matériaux fins présents dans la couche intérieure ou due à de l'affouillement au pied de la structure.</li> <li>• Les processus de déferlements des vagues et d'agitation de la surface libre devant un brise-lame engendrent des flux sédimentaires et des variations dynamiques de la bathymétrie au pied de l'ouvrage.</li> <li>• Plus grande possibilité d'érosion avec une structure submergée qu'avec une structure émergée (1-2).</li> <li>• La réflexion des vagues sur un brise-lame à l'entrée d'un port ou d'une marina peut provoquer un changement dans la bathymétrie et, ainsi, avoir des conséquences sur la manœuvrabilité des bateaux et sur la sécurité de la navigation (3).</li> <li>• Un régime de vague avec une période se situant entre 9 et 11, caractéristique d'une mer active, peut faire varier la bathymétrie au pied d'un brise-lame (3).</li> </ul>
Incertitudes
<ul style="list-style-type: none"> <li>• La compréhension de la dynamique hydraulique et sédimentaire aux alentours des brise-lames n'est pas tout à fait maîtrisée.</li> <li>• L'aménagement de brise-lames submergés en tant que mesure de protection côtière est récent. Ainsi, peu de recherche scientifique font référence à cette mesure (2).</li> </ul>
Entretien
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Un dragage à l'entrée des ports et des marinas est nécessaire afin d'assurer la sécurité nautique (3).</li> </ul>
Impacts environnementaux
<p><b>Abiotique</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Un changement d'énergie du régime de vagues de même que des modifications au processus de sédimentation entraînant un changement de type d'habitat marin.</li> <li>• La création de zones d'eau stagnante a pour effet de diminuer la qualité de l'eau.</li> <li>• Alors que physiquement, les brise-lames partagent des similitudes avec les récifs naturels, sur le plan environnemental, ils se distinguent puisque leur surface est généralement homogène (béton ou pierres concassées) comparativement aux récifs naturels qui sont poreux favorisant la création d'habitats.</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si les matériaux utilisés ne coïncident pas avec ceux présents dans l'environnement, ce type de structure peut entraîner un fort impact visuel (1-3).</li> </ul>	
<b>Biotique</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Introduction d'habitats avec substrat grossier dans un environnement généralement caractérisé par un substrat fin.</li> <li>• L'aménagement de plusieurs structures artificielles peut créer un passage migratoire pour des espèces exotiques pouvant favoriser la dispersion de maladies et d'espèces envahissantes.</li> <li>• La modification du cycle de production et de nutriment de l'habitat côtier.</li> </ul>	
<b>Stratégie de gestion de la zone côtière</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• À la suite de l'aménagement de la structure, une évaluation hydrodynamique de la structure peut être réalisée lors de la première tempête.</li> <li>• Étudier périodiquement la direction et de l'intensité des vagues.</li> <li>• Suivre l'évolution du trait de côte.</li> <li>• Effectuer des relevés granulométriques annuellement.</li> <li>• Effectuer des relevés bathymétriques périodiques pour assurer une bonne sécurité de navigation (3).</li> </ul>	
<b>Relations publiques</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les effets d'un brise-lame sont comparables à un récif naturel.</li> <li>• Permits de protéger la zone côtière tout en permettant à celle-ci de conserver son charme et son élégance (2).</li> <li>• Possibilité d'adapter la conception pour améliorer les conditions de surf de la zone côtière (2).</li> </ul>	
<b>Notes</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les brise-lames submergés ne sont pas visibles. Ils n'ont donc pas d'impact sur l'esthétique et sur les activités touristiques (2).</li> </ul>	
<b>Références</b>	
Airoldi et al. (2005) CERC (2006) Martins et al. (2009) Moschella et al. (2005) Ranasinghe et Turner (2006) Sánchez-Badorrey, Losada et Rodero (2008)	Sumer, Whitehouse et Tørum (2001) Vaidya, Kori et Kudale (2015) Van Rijn (2011) Vaselli, Bulleri et Benedetti-Cecchi (2008) Zanuttigh et al. (2005)
<b>Références de conception</b>	
CERC (2006) Van Rijn (2011)	Zanuttigh et al. (2005)

Tableau-A I-5 Fiche de caractérisation des ouvrages non structuraux de type *Recharge de plage*

Ouvrages non structuraux		Recharges de plage	
	<b>Coûts</b>		<b>Matériaux</b>
	<ul style="list-style-type: none"><li>• Étalés dans le temps</li><li>• Relativement peu dispendieux si un banc d'emprunt est présent dans les environs du projet (&lt;10 km).</li></ul>		<ul style="list-style-type: none"><li>• Sédiments</li></ul>
<b>Description</b>			
<ul style="list-style-type: none"><li>• Cette mesure de protection consiste à importer des sédiments sur le haut estran, puis à laisser la dynamique hydrosédimentaire former un profil de plage équilibré.</li></ul>			
<b>Fonctions</b>			
<ul style="list-style-type: none"><li>• Régulation morphologique de la zone côtière;</li><li>• Augmentation de la protection de la zone côtière face à l'action des vagues et à la submersion;</li><li>• Augmentation de la capacité de dissipation de l'énergie des vagues;</li><li>• Conservation de l'aspect naturel d'une plage;</li><li>• Augmentation de la largeur de la plage;</li><li>• Augmentation du budget sédimentaire dans la cellule côtière.</li><li>• Favorise de l'enrichissement des dunes.</li></ul>			
<b>Informations spécifiques requises pour la conception</b>			
<ul style="list-style-type: none"><li>• Granulométrie</li><li>• Topographie de l'écosystème côtier</li></ul>			
<b>Stratégie de conception</b>			
<ul style="list-style-type: none"><li>• Tenir compte du processus saisonnier, annuel et décennal d'érosion et d'accrétion de la côte.</li><li>• Ajuster le volume de rechargement au taux de recul annuel du trait de côte.</li><li>• Utiliser un ratio de surchargement comme facteur de sécurité afin de compenser la perte de sédiments fins au moment de l'aménagement de l'ouvrage.</li><li>• Considérer le profil équilibré recherché (CEM Équation III-3-14).</li><li>• Considérer l'impact de la diffusion des sédiments sur les côtes adjacentes.</li><li>• Utiliser un banc d'emprunt offrant des sédiments ayant une granulométrie similaire ou ayant des sédiments légèrement plus grossiers que la granulométrie du site de rechargement. L'ajout de sédiments légèrement plus grossiers permet d'augmenter la résistance de la plage tout en permettant un ajustement du profil selon les conditions de vagues.</li><li>• Possibilité de choisir un banc d'emprunt terrestre ou sous-marin, en fonction des coûts de transport et de mise en place des sédiments.</li><li>• Positionner les sédiments d'emprunt de façon à obtenir un profil de plage similaire au profil existant.</li></ul>			

<ul style="list-style-type: none"> <li>Utiliser l'action des vagues et des courants littoraux afin d'ajuster naturellement le profil de plage.</li> </ul>
<b>Vérifications spécifiques avec un modèle numérique</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Profil d'équilibre temporel</li> <li>Taux d'érosion temporel</li> <li>Changements granulométriques temporels</li> <li>Diffusion latérale des sédiments</li> </ul>
<b>Combinaison d'ouvrages</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>L'ajout d'épis maritimes à un projet de recharge de plage permet de limiter la perte de sédiments provoquée par les courants littoraux.</li> <li>L'ajout de brise-lames submergés permet d'accroître la durée de vie de la recharge de plage en diminuant l'énergie des vagues dans les limites de la plage.</li> <li>L'utilisation de plantes comme l'<i>élyme des sables</i> permet de stabiliser l'arrière-plage et les dunes.</li> </ul>
<b>Précautions</b>
<p><b>Conception</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>L'importance de sélectionner un banc d'emprunt ayant une granulométrie semblable à la granulométrie du littoral vient du fait que l'action des vagues provoque une redistribution des sédiments à la suite du rechargement. Les sédiments grossiers demeurent dans la partie supérieure du haut estran et sur la haute plage, alors que les sédiments fins migrent dans la partie inférieure du haut estran, dans le bas estran et dans la plage sous-marine provoquant un profil de plage irrégulier. Le haut estran sera plus abrupte et le bas estran moins abrupt qu'anticipé augmentant ainsi la réflexion sur le haut estran provoquant de l'affouillement et de l'érosion dans le bas estran. Ainsi, une pente trop abrupte du profil de plage provoquera une perte excessive de sédiments.</li> <li>L'utilisation de sédiments plus fins que ceux en place provoque une pente plus faible et une largeur de plage moins grande. De plus, les sédiments plus fins sont plus facilement transportables par les courants littoraux.</li> <li>L'utilisation de sédiments plus grossiers rend la plage plus statique, c'est-à-dire que la morphologie est incapable de s'adapter aux différentes conditions de vagues et ainsi, la dissipation des vagues est inefficace.</li> <li>Le manque d'informations sur la dynamique hydrosédimentaire peut mener à une durée de vie plus courte qu'anticipée.</li> </ul> <p><b>Aménagement</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Dans l'éventualité où le banc d'emprunt choisi est sous-marin, il est important de s'assurer que la modification de la profondeur d'eau à l'endroit choisi n'affectera pas la dynamique hydrosédimentaire.</li> </ul> <p><b>Opération</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Le profil de plage peut varier en fonction de la dynamique hydrosédimentaire dans les années suivant l'aménagement.</li> </ul>
<b>Incertitudes</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Difficulté à prédire précisément le comportement morphologique et sédimentaire de cet ouvrage.</li> <li>Sévérité et fréquence de tempête plus élevée que prévu lors de la conception.</li> <li>Disponibilité et qualité des granulats potentiels pour une recharge de plage.</li> <li>Variation potentielle des lois, des règlements et des budgets.</li> </ul>

Entretien
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Un suivi constant doit être effectué et des rechargements périodiques doivent être envisagés afin d'assurer la pérennité de l'ouvrage.</li> <li>• On doit compter entre trois et dix années de rechargements périodiques, de moindre envergure que le rechargement initial, pour obtenir une stabilité du trait de côte.</li> </ul>
Impacts environnementaux
<p><b>Abiotique</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Le changement de température, du taux d'oxygène, de la salinité et de la luminosité dans l'eau.</li> <li>• La possibilité de mise en suspension de nutriments et de composés chimiques.</li> <li>• Une détérioration de l'environnement au banc d'emprunt.</li> </ul> <p><b>Biotique</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Les mécanismes d'impacts potentiels sont l'ensevelissement, l'utilisation de machinerie ainsi que les changements aux propriétés des habitats soit la granulométrie, la pente et la largeur de la plage.</li> <li>• Une altération temporaire de l'abondance, la diversité et la composition des espèces présente dans la zone intertidale a été remarquée par plusieurs scientifiques</li> <li>• À court terme, un déplacement ou un ensevelissement des espèces marines perturbant la chaîne alimentaire locale sont observés. Également, un ensevelissement des matières organiques et des nutriments permettant aux espèces de se nourrir survient.</li> <li>• À long terme, les espèces sont en mesure de se régénérer et de repeupler le site de la recharge de plage. La vitesse de régénération est fonction du cycle de vie de chacune des espèces.</li> <li>• Perturbation des espèces utilisant la zone de rechargement comme lieu de reproduction, de nidification ou d'élevage. Prévoir les travaux à l'extérieur de ses périodes.</li> </ul>
Stratégie de gestion de la zone côtière
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Implantation d'un système de gestion et de surveillance couvrant la bathymétrie et la topographie sur plusieurs années permettant ainsi de suivre les variations saisonnières, annuelles et décennales du trait de côte.</li> <li>• L'établissement d'un réseau de surveillance par appareil photographique des variations de la zone côtière permet d'illustrer des changements morphologiques précis et inapparents dans les relevés géodésiques.</li> <li>• L'enregistrement de la position de la base des dunes et du niveau moyen des mers permet de faire un suivi du taux d'érosion.</li> <li>• L'étude du comportement et de l'efficacité de la recharge de plage permet d'évaluer l'efficience de la mesure de protection et de justifier des rechargements d'entretien subséquents.</li> </ul>
Bénéfices spécifiques
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ce type de mesure de protection, selon le contexte, ne fait pas obstacle ou favorise l'industrie touristique.</li> </ul>

Relations publiques		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ce type de mesure de protection est privilégié dans les régions touristiques en raison des bénéfices apportés pour la pratique de loisirs ainsi que pour son effet neutre sur l'esthétique du paysage.</li> <li>• La recharge de plage est une technique complexe et controversée nécessitant des séances d'informations publiques pour faire connaître le fonctionnement de l'ouvrage, les phases du projet, les incertitudes, la comparaison avec d'autres ouvrages, le financement ainsi que les impacts économiques.</li> <li>• La controverse associée aux rechargements de plage est reliée au doute populaire de l'efficacité de cet ouvrage en tant que mesure de protection.</li> </ul>		
Notes		
<p>La première utilisation d'une recharge de plage remonte à 1950 au Portugal. La recharge de plage est une technique de plus en plus acceptée sur le plan environnemental pour les urgences à court terme ainsi qu'en tant que solution à long terme. Une diffusion des sédiments temporelle se produit. Il est important de réaliser que la diffusion est à un impact important sur la perception populaire puisqu'elle est interprétée comme étant une perte de sédiment. En fait, ce phénomène est le témoin du reprofilage de la plage. La durabilité de l'ouvrage, c'est-à-dire le temps que prend l'ouvrage à perdre ses fonctions de protection de la zone côtière et de tourisme, est fortement variable. Sur la côte est américaine, la majorité des projets sans rechargement périodique ont une durée de vie de deux à cinq ans.</p> <p>La MLCEC de type riprap est une recharge de plage faite avec des matériaux grossiers. Ce type de MLCEC permet d'obtenir une pente de plage beaucoup plus raide que la recharge de plage faite avec des sédiments ayant une granulométrie similaire à la granulométrie des sédiments naturels.</p>		
Références		
Adriaanse et Coosen (1991) Bird et Lewis (2015) Blott et Pye (2004) Campbell (2004) Daniel (2001) Davison, Nicholls et Leatherman (1992)	Elko, Holman et Gelfenbaum (2005) CERC (2006) Hamm et al. (2002) Hanson et al. (2002) Kelley, Ramsey et Byrnes (2004)	Leewis et al. (2012) Schlacher et al. (2012) Seymour et al. (1995) Van Der Wal (2004) Van Rijn (2011)
Références de conception		
CERC (2006) Hamm et al. (2002)		





## ANNEXE II

### EXPLICATION DE LA MÉTHODE AHP

#### Méthode AHP

La méthode AHP est formée de deux phases : (i) phase de configuration et (ii) phase d'exploitation.

#### Phase de configuration

La phase de configuration de la méthode AHP est employée pour définir les paramètres de la méthode AHP en établissant l'importance relative des critères d'aide à la décision et des mesures de lutte contre l'érosion côtière. Cette phase est validé par une relation mathématique de cohérence. La phase de configuration se divise en trois étapes : (i) établissement de la structure de décision; (ii) établissement de l'importance relative des critères d'aide à la décision; (iii) établissement de l'importance relative des mesures de lutte contre l'érosion côtière par rapport aux critères (Ounnar et al., 2013).

L'établissement de la structure de décision vise à représenter sur un schéma les relations entre les niveaux décisionnels : objectif général, critères d'aide à la décision, mesures de lutte contre l'érosion côtière (tableau-A II-1) (Ounnar et al.).

Tableau-A II-1 Éléments composant la structure décisionnelle d'un projet selon la méthode AHP

Obectif général	<ul style="list-style-type: none"><li>Analyser la demande du client de l'étude.</li><li>Orienter le choix des critères d'aide à la décision.</li></ul>
Critères d'aide à la décision	<ul style="list-style-type: none"><li>Définir la complexité de l'objectif général de façon exhaustive, opérationnelle, concise et cohérente.</li></ul>
Mesures de lutte contre l'érosion côtière	<ul style="list-style-type: none"><li>Identifier les éléments de solution présentant potentiellement des intérêts envers les critères d'aide à la décision.</li></ul>

L'établissement de l'importance relative des critères d'aide à la décision vise à exprimer une priorité relative entre les critères dans une matrice de priorité [C] dont les éléments  $[C_{ij}]$  sont

des comparaisons binaire ( $C_i, C_j$ ) avec  $C_{ij} = 1/C_{ji}$  et  $C_{ii} = 1$  (Ounnar et al.). Les comparaisons binaires sont effectuées avec l'échelle de pondération de Saaty dont les valeurs, correspondant aux degrés de priorité, se situent entre 1 et 9 (tableau-A II-2). La numérotation paire est utilisée pour nuancer les degrés de priorité.

Tableau-A II-2 Échelle de pondération des degrés de priorité de la méthode AHP

Degrés de priorité	Poids associé
Même ordre de grandeur	1
Légèrement plus important	3
Plus important	5
Beaucoup plus important	7
Nettement plus important	9

La matrice de priorité est utilisée pour calculer les vecteurs de priorités de chacun des critères d'aide à la décision [ $W_{co}$ ] au moyen l'équation suivante :

$$\text{vecteur de priorité d'un critère} = \frac{\sum_{\text{ligne}} \frac{\text{Poids comparaison binaire}}{\sum \text{Colonne}}}{\text{Nombre de critère}} \quad (\text{A II-1})$$

La cohérence de la pondération des critères d'aide à la décision est vérifiée par en calculant le vecteur de cohérence CR. Si  $CR > 0,1$ , les jugements établis avec la pondération de la matrice de priorité doivent être corrigés.

$$CR = \frac{\frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n - 1)}}{RI} \quad (\text{A II-2})$$

$\lambda_{\max}$  correspond à la valeur propre de la matrice,  $n$  est le nombre d'éléments à comparer et  $RI$  est un nombre aléatoire fonction de  $n$  et qui est indiqué dans une table *ad hoc*.

### **Phase d'exploitation**

La phase d'exploitation de la méthode AHP vise à établir l'importance relative des alternatives par rapport à l'objectif global en agrégeant les degrés de priorité. La phase d'exploitation se divise en trois étapes : (i) calcul de l'importance relative des mesures de lutte contre l'érosion côtière en fonction des critères d'aide à la décision; (ii) calcul de l'importance relative des mesures de lutte contre l'érosion côtière en fonction de l'objectif global.

Le calcul de l'importance relative des mesures de lutte contre l'érosion côtière en fonction des critères d'aide à la décision vise à effectuer une hiérarchisation des mesures de lutte contre l'érosion côtière par rapport à chacun des critères. Une matrice de jugement de priorité est alors construite pour chacun des critères. La procédure utilisée pour l'établissement de l'importance relative des critères d'aide à la décision de la phase de configuration est employé de nouveau pour cette étape permettant d'obtenir un vecteur exprimant la hiérarchisation des mesures de lutte contre l'érosion côtière par rapport à chacun des critères  $[W_{AC}]$ .

Le calcul de la hiérarchisation des mesures de lutte contre l'érosion côtière en fonction de l'objectif global s'effectue en multipliant la matrice  $[W_{AC}]$  par le vecteur de hiérarchisation des critères  $[W_{CO}]$  (Ounnar et al.).

$$[W_{AO}] = [W_{AC}] \times [W_{CO}] \quad (\text{A II-3})$$

Les mesures de lutte contre l'érosion côtière hiérarchisées sont présentées dans un tableau synthèse qui permet d'analyser les résultats de chacune des étapes de la méthode AHP.



## **ANNEXE III**

### **QUESTIONNAIRE**

Des entretiens consultatifs auprès d'organismes impliqués dans la gestion de la zone côtière de la Baie-des-Chaleurs en Gaspésie ont eu lieu dans le cadre de travaux réalisés avec la firme de services-conseils PESCA Environnement. Des données représentant les priorités de gestion de la zone côtière des organismes consultés ont été acquies par ses entretiens. Le tableau-A III-1 présente le questionnaire ayant été utilisé dans le cadre des entretiens. Les données ont été utilisées pour la pondération des critères dans la méthode AHP.

Tableau-A III-1 Questionnaire employé lors des entretiens consultatifs avec la firme PESCA  
Environnement

Affirmation	Choix de réponses			Priorité (1 à 9)
<b>Économie locale</b> <i>En terme d'économie locale, un ouvrage de protection côtière joue un rôle de :</i>	Développement de nouveaux secteurs économiques	Appui aux secteurs économiques existants	Aucun rôle en particulier	
<b>Loisirs</b> <i>Dans la pratique de loisirs en zone côtière, un ouvrage de protection côtière joue un rôle de :</i>	Création de nouveaux loisirs	Appui aux loisirs existants	Aucun rôle en particulier	
<b>Intégration au paysage</b> <i>Voir un ouvrage de protection côtière est :</i>	Acceptable	Tolérable	À éviter	
<b>Perturbations environnementales temporaires</b> <i>Les changements temporaires des écosystèmes dus à l'aménagement ou l'entretien de l'ouvrage de protection sont :</i>	Acceptables	Tolérables	À éviter	
<b>Changements environnementaux permanents</b> <i>Des changements permanents de l'abondance, de la composition et de la diversité des écosystèmes sont :</i>	Acceptables	Tolérables	À éviter	
<b>Processus littoraux</b> <i>Les répercussions de l'érosion sur les terrains adjacents à l'ouvrage de protection côtière sont :</i>	Acceptables	Tolérables	À éviter	
<b>Protection des infrastructures</b> <i>Lors d'un événement météorologique extrême, de l'érosion et des inondations sont :</i>	Acceptables	Tolérables	À éviter	
<b>Fiabilité structurale</b> <i>À la suite d'un événement météorologique extrême, le fait qu'un entretien de l'ouvrage de protection soit nécessaire est:</i>	Acceptable	Tolérable	À éviter	
<b>Changements climatiques</b> <i>Les changements climatiques affectant éventuellement l'efficacité de la mesure de protection côtière d'ici 20 ans sont :</i>	Acceptables	Tolérables	À éviter	

## ANNEXE IV

### MESURES DE LUTTE CONTRE L'ÉROSION CÔTIÈRE HIÉRARCHISÉES PAR LES ORGANISMES

Tableau-A IV-1 Synthèse des résultats de l'analyse multicritère AHP en fonction des priorités en matière de gestion de la zone côtière de la municipalité de Maria

Classement	Techniques d'intervention			Synthèse de la pondération									
	Position		Pourcentage final  (%)	30,7	21,9	15,5	11,0	7,8	5,6	2,7	2,7	1,9	
				Protection des infrastructures	Fiabilité structurale	Changements climatiques	Chang. envir. permanents	Économie locale	Processus littoraux	Perturb. envir. temp.	Loisirs	Intégration au paysage	
				(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
	1	Mur de protection		19,7	26,7	34,3	4,1	3,2	23,2	2,5	24,2	6,7	7,5
	2	Rechargement de plage		17,6	9,7	2,2	34,7	26,8	23,2	40,5	2,6	40,3	27,2
	3	Enrochement		14,3	26,7	9,9	4,1	3,2	23,2	3,6	24,2	4,6	4,9
	4	Épi maritime		13,6	6,0	13,2	15,5	37,7	10,5	7,0	10,0	17,8	14,8
	5	Brise-lame submergé		12,2	5,7	23,1	2,8	14,2	3,7	21,4	24,2	18,3	38,1
	6	Rip-rap		11,7	9,7	12,3	23,4	4,9	7,7	14,8	10,0	2,4	4,9
7	Brise-lame émergé	11,0	15,5	4,9	15,5	10,0	8,5	10,2	4,8	9,9	2,5		

Tableau-A IV-2 Synthèse des résultats de l'analyse multicritère AHP en fonction des priorités en matière de gestion de la zone côtière de la municipalité de Port-Daniel

Classement	Techniques d'intervention			Synthèse de la pondération								
	Position		Pondération	32,7	17,1	17,1	12,0	8,6	4,6	3,2	3,2	1,5
			(%)	Protection des infrastructures	Économie locale	Changements climatiques	Fiabilité structurale	Processus littoraux	Loisirs	Intégration au paysage	Chang. envir. permanents	Perturb. envir. temp.
				(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
	1	Rechargement de plage	20,9	11,0	23,2	34,7	2,2	40,5	40,3	27,2	26,8	2,6
	2	Mur de protection	20,6	32,5	23,2	4,1	34,3	2,5	6,7	7,5	3,2	24,2
	3	Enrochement	13,8	20,8	23,2	4,1	9,9	3,6	4,6	4,9	3,2	24,2
	4	Rip-rap	12,6	12,1	7,7	23,4	12,3	14,8	2,4	4,9	4,9	10,0
	5	Brise-lame submergé	11,2	8,0	3,7	2,8	23,1	21,4	18,3	38,1	14,2	24,2
	6	Brise-lame émergé	10,5	12,1	8,5	15,5	4,9	10,2	9,9	2,5	10,0	4,8
7	Épi maritime	10,4	3,5	10,5	15,5	13,2	7,0	17,8	14,8	37,7	10,0	

Tableau-A IV-3 Synthèse des résultats de l'analyse multicritère AHP en fonction des priorités en matière de gestion de la zone côtière de la municipalité de Saint-Siméon

Classement	Techniques d'intervention			Synthèse de la pondération								
	Position		Pondération (%)	27,6	20,3	17,5	12,7	8,5	6,0	3,6	2,2	1,8
				Loisirs	Intégration au paysage	Perturb. envir. temp.	Processus littoraux	Chang. envir. permanents	Protection des infrastructures	Économie locale	Fiabilité structurale	Changements climatiques
				(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
	1	Rechargement de plage	26,7	40,3	27,2	2,6	40,5	26,8	11,0	23,2	2,2	34,7
	2	Brise-lame submergé	22,1	18,3	38,1	24,2	21,4	14,2	8,0	3,7	23,1	2,8
	3	Épi maritime	14,9	17,8	14,8	10,0	7,0	37,7	3,5	10,5	13,2	15,5
	4	Mur de protection	11,8	6,7	7,5	24,2	2,5	3,2	32,5	23,2	34,3	4,1
	5	Enrochement	9,6	4,6	4,9	24,2	3,6	3,2	20,8	23,2	9,9	4,1
	6	Brise-lame émergé	7,6	9,9	2,5	4,8	10,2	10,0	12,1	8,5	4,9	15,5
7	Rip-rap	7,4	2,4	4,9	10,0	14,8	4,9	12,1	7,7	12,3	23,4	

Tableau-A IV-4 Synthèse des résultats de l'analyse multicritère AHP en fonction des priorités en matière de gestion de la zone côtière de la ville de Carleton-sur-Mer

Classement	Techniques d'intervention			Synthèse de la pondération								
	Position		Pondération (%)	30,2	21,5	15,1	10,5	7,8	6,9	3,7	2,7	1,6
				Économie locale	Fiabilité structurale	Protection des infrastructures	Chang. envir. permanents	Intégration au paysage	Processus littoraux	Loisirs	Changements climatiques	Perturb. envir. temp.
				(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
	1	Mur de protection	20,3	23,2	34,3	26,7	3,2	7,5	2,5	6,7	4,1	24,2
	2	Rechargement de plage	19,1	23,2	2,2	9,7	26,8	27,2	40,5	40,3	34,7	2,6
	3	Enrochement	14,8	23,2	9,9	26,7	3,2	4,9	3,6	4,6	4,1	24,2
	4	Brise-lame submergé	14,1	3,7	23,1	5,7	14,2	38,1	21,4	18,3	2,8	24,2
	5	Épi maritime	13,8	10,5	13,2	6,0	37,7	14,8	7,0	17,8	15,5	10,0
6	Rip-rap	9,2	7,7	12,3	9,7	4,9	4,9	14,8	2,4	23,4	10,0	
7	Brise-lame émergé	8,8	8,5	4,9	15,5	10,0	2,5	10,2	9,9	15,5	4,8	



Tableau-A IV-5 Synthèse des résultats de l'analyse multicritère AHP en fonction des priorités en matière de gestion de la zone côtière de la ville de New Richmond

Classement	Techniques d'intervention			Synthèse de la pondération								
	Position		Pourcentage final (%)	34,2	19,6	14,1	10,0	7,6	6,7	3,8	2,5	1,5
				Processus littoraux	Perturb. envir. temp.	Intégration au paysage	Chang. envir. permanents	Changements climatiques	Protection des infrastructures	Fiabilité structurale	Économie locale	Loisirs
				(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
	1	Rechargement de plage	25,6	40,5	2,6	27,2	26,8	34,7	11,0	2,2	23,2	40,3
	2	Brise-lame submergé	20,8	21,4	24,2	38,1	14,2	2,8	8,0	23,1	3,7	18,3
	3	Épi maritime	12,7	7,0	10,0	14,8	37,7	15,5	3,5	13,2	10,5	17,8
	4	Rip-rap	11,5	14,8	10,0	4,9	4,9	23,4	12,1	12,3	7,7	2,4
	5	Mur de protection	11,4	2,5	24,2	7,5	3,2	4,1	32,5	34,3	23,2	6,7
	6	Enrochement	9,7	3,6	24,2	4,9	3,2	4,1	20,8	9,9	23,2	4,6
7	Brise-lame émergé	8,3	10,2	4,8	2,5	10,0	15,5	12,1	4,9	8,5	9,9	

Tableau-A IV-6 Synthèse des résultats de l'analyse multicritère AHP en fonction des priorités en matière de gestion de la zone côtière de la ville de Paspébiac

Classement	Techniques d'intervention			Synthèse de la pondération								
	Position		Pourcentage final  (%)	31,0	22,4	16,2	11,8	6,4	4,1	3,6	2,9	1,7
				Économie locale	Loisirs	Intégration au paysage	Processus littoraux	Protection des infrastructures	Changements climatiques	Fiabilité structurale	Chang. envir. permanents	Perturb. envir. temp.
				(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
	1	Rechargement de plage		28,4	23,2	40,3	27,2	40,5	11,0	34,7	2,2	26,8
	2	Brise-lame submergé	16,2	3,7	18,3	38,1	21,4	8,0	2,8	23,1	14,2	24,2
	3	Mur de protection	14,2	23,2	6,7	7,5	2,5	32,5	4,1	34,3	3,2	24,2
	4	Épi maritime	13,0	10,5	17,8	14,8	7,0	3,5	15,5	13,2	37,7	10,0
	5	Enrochement	11,8	23,2	4,6	4,9	3,6	20,8	4,1	9,9	3,2	24,2
	6	Brise-lame émergé	8,4	8,5	9,9	2,5	10,2	12,1	15,5	4,9	10,0	4,8
7	Rip-rap	8,0	7,7	2,4	4,9	14,8	12,1	23,4	12,3	4,9	10,0	

Tableau-A IV-7 Synthèse des résultats de l'analyse multicritère AHP en fonction des priorités en matière de gestion de la zone côtière du Comité ZIP Gaspésie

Classement	Techniques d'intervention			Synthèse de la pondération									
	Position		Pondération  (%)	32,9	25,2	12,1	12,1	7,1	4,0	2,9	2,1	1,7	
				Chang. envír. permanents	Processus littoraux	Perturb. envír. temp.	Intégration au paysage	Changements climatiques	Protection des infrastructures	Loisirs	Fiabilité structurale	Économie locale	
				(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
	1	Rechargement de plage		27,1	26,8	40,5	2,6	27,2	34,7	9,7	40,3	2,2	23,2
	2	Épi maritime		19,5	37,7	7,0	10,0	14,8	15,5	6,0	17,8	13,2	10,5
	3	Brise-lame submergé		19,1	14,2	21,4	24,2	38,1	2,8	5,7	18,3	23,1	3,7
	4	Rip-rap		9,6	4,9	14,8	10,0	4,9	23,4	9,7	2,4	12,3	7,7
	5	Brise-lame émergé		9,0	10,0	10,2	4,8	2,5	15,5	15,5	9,9	4,9	8,5
	6	Mur de protection		8,2	3,2	2,5	24,2	7,5	4,1	26,7	6,7	34,3	23,2
	7	Enrochement		7,5	3,2	3,6	24,2	4,9	4,1	26,7	4,6	9,9	23,2

Tableau-A IV-8 Synthèse des résultats de l'analyse multicritère AHP en fonction des priorités en matière de gestion de la zone côtière de la SCFG

Classement	Techniques d'intervention		Synthèse de la pondération										
	Position		Pondération (%)	30,4	21,7	13,7	12,1	9,4	5,0	3,5	2,5	1,8	
				Protection des infrastructures	Économie locale	Fiabilité structurale	Changements climatiques	Chang. envir. permanents	Processus littoraux	Loisirs	Perturb. envir. temp.	Intégration au paysage	
				(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
	1	Mur de protection		19,7	26,7	23,2	34,3	4,1	3,2	2,5	6,7	24,2	7,5
	2	Rechargement de plage		18,9	9,7	23,2	2,2	34,7	26,8	39,9	40,3	2,6	27,2
	3	Enrochement		16,3	26,7	23,2	9,9	4,1	3,2	3,6	4,6	24,2	4,9
	4	Épi maritime		12,8	6,0	10,5	13,2	15,5	37,7	7,3	17,8	10,0	14,8
	5	Brise-lame émergé		11,1	15,5	8,5	4,9	15,5	10,0	10,2	9,9	4,8	2,5
	6	Rip-rap		10,8	9,7	7,7	12,3	23,4	4,9	14,9	2,4	10,0	4,9
7	Brise-lame submergé	10,4		5,7	3,7	23,1	2,8	14,2	21,6	18,3	24,2	38,1	

## LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adriaanse, L. A., et J. Coosen. 1991. « Beach and dune nourishment and environmental aspects ». *Coastal Engineering*, vol. 16, n° 1, p. 129-146.
- Airoidi, L., M. Abbiati, M. W. Beck, S. J. Hawkins, P. R. Jonsson, D. Martin, P. S. Moschella, A. Sundelöf, R. C. Thompson et P. Åberg. 2005. « An ecological perspective on the deployment and design of low-crested and other hard coastal defence structures ». *Coastal Engineering*, vol. 52, n° 10, p. 1073-1087.
- Anfuso, Giorgio, et Francisco-Javier Gracia. 2005. « Morphodynamic Characteristics and Short-Term Evolution of a Coastal Sector in SW Spain: Implications for Coastal Erosion Management ». *Journal of Coastal Research*, vol. 21, n° 6, p. 1139-1153.
- Basco, D. R. 2006. « Seawall Impacts on Adjacent Beaches: Separating Fact from Fiction ». *Journal of Coastal Research*, p. 741-744.
- Ben Mena, Sami. 2000. « Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision ». *BASE*, vol. 4, p. 10.
- Benedet, Lindino, Charles W. Finkl, Thomas Campbell et Antonio Klein. 2004. « Predicting the effect of beach nourishment and cross-shore sediment variation on beach morphodynamic assessment ». *Coastal Engineering*, vol. 51, n° 8, p. 839-861.
- Bernatchez, Pascal, Steeve Dugas, Christian Fraser et Laurent Da Silva. 2015. *Évaluation économique des impacts potentiels de l'érosion des côtes du Québec maritime dans un contexte de changements climatiques*. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski, 45 p.
- Bernatchez, Pascal, et Christian Fraser. 2012. « Evolution of Coastal Defence Structures and Consequences for Beach Width Trends, Québec, Canada ». *Journal of Coastal Research*, vol. 28, n° 6, p. 1550-1566.
- Bernatchez, Pascal, et Jean-Marie M. Dubois. 2004. « Bilan des connaissances de la dynamique de l'érosion des côtes du Québec maritime laurentien ». *Géographie physique et Quarternaire*, vol. 58, n° 1, p. 45-71.
- Bernatchez, Pascal, et Chantal Quintin. 2016. « Potentiel de migration des écosystèmes côtiers meubles québécois de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent dans le contexte de la hausse appréhendée du niveau de la mer ». *Le Naturaliste canadien*, vol. 140, n° 2, p. 91-104.

- Bernatchez, Pascal, Tarik Toubal, Stéphanie Van-Wiersts, Susan Drejza, Stéphanie Friesinger, Dominique Paquin, Steeve Dugas, Tristan Boutin-Miller, Marjolaine De Sinety, François Miousse, Sébastien Pomerleau, Catherine Denis, Étienne Blanchard, Isabelle Lemus-Lauzon et David Lacombe. 2010. *Caractérisation sédimentologique et géomorphologique des unités hydrosédimentaires de Pointe-aux-Loups et de la Baie de Plaisance, route 199, Îles-de-la-Madeleine*. Université du Québec à Rimouski, 177 p.
- Berry, Ashton J., Shireen Fahey et Noel Meyers. 2014. « Boulderdash and beachwalls – The erosion of sandy beach ecosystem resilience ». *Ocean and Coastal Management*, vol. 96, p. 104-111.
- Bertasi, Fabio, Marina Colangelo, Marco Abbiati et Victor Ceccherelli. 2007. « Effects of an artificial protection structure on the sandy shore macrofaunal community: the special case of Lido di Dante (Northern Adriatic Sea) ». *Hydrobiologia*, vol. 586, n° 1, p. 277-290.
- Birben, Ali Remzi, İsmail Hakkı Özölçer, Servet Karasu et Murat İhsan Kömürcü. 2007. « Investigation of the effects of offshore breakwater parameters on sediment accumulation ». *Ocean Engineering*, vol. 34, n° 2, p. 284-302.
- Bird, Eric, et Nick Lewis. 2015. *Beach Renourishment* (2015). Cham: Springer International Publishing : Imprint: Springer, 137 p.
- Blott, Simon J., et Kenneth Pye. 2004. « Morphological and Sedimentological Changes on an Artificially Nourished Beach, Lincolnshire, UK ». *Journal of Coastal Research*, vol. 20, n° 1, p. 214-233.
- Bourgou, Mongi, et Jean-Marie Miossec. 2010. *Les littoraux : enjeux et dynamiques* (2010), 1<sup>re</sup> éd. Paris: Presses universitaires de France, 295 p.
- Boyer-Villemaire, Ursule, Moktar Lamari, Pascal Bernatchez, Johann Lucas Jacob et Kankoué Nouwodjro. 2015. « Analyse institutionnelle de la trajectoire d'adaptation aux changements climatiques dans le Québec maritime ». In *Adaptation aux changements climatiques en zones côtières : politiques publiques et indicateurs de suivi des progrès dans sept pays occidentaux*. p. 434. Presses de l'Université du Québec.
- Caillet, Renaud. 2003. *Analyse multicritère : Étude de comparaison des méthodes existantes en vue d'une application en analyse de cycle de vie*. Coll. « Série Scientifique ». Montréal.

- Campbell, Thomas J. 2004. « Coupling Geological Concepts with Historical Data Sets in a MIS Framework to Prospect for Beach-Compatible Sands on the Inner Continental Shelf: Experience on the Eastern Texas Gulf Coast ». *Journal of Coastal Research*, vol. 20, n° 2, p. 533-549.
- Casini, Marco, Chiara Mocenni, Simone Paoletti et Marco Pranzo. 2015. « Decision support system development for integrated management of European coastal lagoons ». *Environmental Modelling and Software*, vol. 64, p. 47-57.
- CERC. 1984. *Shore protection manual*, 4<sup>th</sup> ed. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, 652 p.
- CERC. 2006. *Coastal Engineering Manual* (2006). Coll. « CEM ». Washington, D.C.: U.S. Army Corps of Engineers.
- Charlier, Roger H., Marie Claire P. Chaineux et Selim Morcos. 2005. « Panorama of the History of Coastal Protection ». *Journal of Coastal Research*, vol. 21, n° 1, p. 79-111.
- Chouinard, Omer, Juan Baztan, Jean-Paul Vanderlinden et Alioune Ba. 2011. *Zones côtières et changement climatique : le défi de la gestion intégrée* (2011). Québec: Presses de l'Université du Québec, 242 p.
- Church, John, et Neil White. 2011. « Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century ». *Surveys in Geophysics*, vol. 32, n° 4, p. 585-602.
- CIDCO. 2011. *Levés côtiers pour l'évaluation de la dynamique sédimentaire aux Îles-de-la-Madeleine*. 10 p.
- Daigle, Réal, Don Forbes, Liette Vasseur, Sue Nichols, Dominique Bérubé, Keith Thompson, Hal Ritchie, Alan Hanson, Éric Trembaly, George Parkes, Kelly Murphy et Tim Webster. 2006. *Impacts de l'élévation du niveau de la mer et du changement climatique sur la zone côtière du sud-est du Nouveau-Brunswick*. 644 p.
- Dalcourt, Marie-France, Danielle Dorion, Brigitte Gingras, Daniel Le Sauter, Jean Morisset et Richard Lalumière. 2002. *La gestion intégrée à la portée de tous : Démarche méthodologique pour les collectivités côtières du Saint-Laurent marin*. Québec: Pêches et Océans Canada, 55 p.
- Daniel, Heather. 2001. « Replenishment versus retreat: the cost of maintaining Delaware's beaches ». *Ocean and Coastal Management*, vol. 44, n° 1, p. 87-104.
- Davison, A. Todd, Robert J. Nicholls et Stephen P. Leatherman. 1992. « Beach Nourishment as a Coastal Management Tool: An Annotated Bibliography on Developments Associated with the Artificial Nourishment of Beaches ». *Journal of Coastal Research*, vol. 8, n° 4, p. 984-1022.

- Dessau. 2013. *Projet de restauration de sédiments au port de Gaspé - Sandy Beach*. Transport Canada, 45 p.
- Drejza, Susan, Pascal Bernatchez et Clermont Dugas. 2011. « Effectiveness of land management measures to reduce coastal georisks, eastern Québec, Canada ». *Ocean & Coastal Management*, vol. 54, n° 4, p. 290-301.
- Drejza, Susan, Stéphanie Friesinger et Pascal Bernatchez. 2014. *Vulnérabilité des infrastructures routières de l'Est du Québec à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques*. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski, 226 p.
- Drejza, Susan, Stéphanie Friesinger et Pascal Bernatchez. 2015. *Vulnérabilité des infrastructures routières de l'Est du Québec à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques*. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski, 308 p.
- Elko, Nicole A., Robert A. Holman et Guy Gelfenbaum. 2005. « Quantifying the Rapid Evolution of a Nourishment Project with Video Imagery ». *Journal of Coastal Research*, vol. 21, n° 4, p. 633-645.
- Félix, A., A. Baquerizo, J. M. Santiago et M. A. Losada. 2012. « Coastal zone management with stochastic multi-criteria analysis ». *Journal of Environmental Management*, vol. 112, p. 252-266.
- Forst, Mark F. 2009. « The convergence of Integrated Coastal Zone Management and the ecosystems approach ». *Ocean and Coastal Management*, vol. 52, n° 6, p. 294-306.
- Gabriel, Anthony O., et Thomas A. Terich. 2005. « Cumulative Patterns and Controls of Seawall Construction, Thurston County, Washington ». *Journal of Coastal Research*, vol. 21, n° 3, p. 430-440.
- Garmendia, Eneko, Gonzalo Gamboa, Javier Franco, Joxe Mikel Garmendia, Pedro Liria et Marta Olazabal. 2010. « Social multi-criteria evaluation as a decision support tool for integrated coastal zone management ». *Ocean and Coastal Management*, vol. 53, n° 7, p. 385-403.
- Gendron, Corrine (352). 2004. *La gestion environnementale et la norme ISO 14001*.
- Genivar. 2012a. *Analyse de solutions en érosion côtière à l'anse aux Coques, Sainte-Luce*. 131 p.
- Genivar. 2012b. *Analyse de solutions en érosion côtière de la Baie de Tadoussac*. 131 p.

- GIEC. 2014. *Changements climatiques 2014: Incidences, adaptation et vulnérabilité – Résumé à l'intention des décideurs*. Genève (Suisse), 34 p.
- Hamm, L., M. Capobianco, H. H. Dette, A. Lechuga, R. Spanhoff et M. J. F. Stive. 2002. « A summary of European experience with shore nourishment ». *Coastal Engineering*, vol. 47, n° 2, p. 237-264.
- Hanson, H., A. Brampton, M. Capobianco, H. H. Dette, L. Hamm, C. Laustrop, A. Lechuga et R. Spanhoff. 2002. « Beach nourishment projects, practices, and objectives—a European overview ». *Coastal Engineering*, vol. 47, n° 2, p. 81-111.
- Hausler, R., P. Béron et A. Hade. 1994. « Total quality management for environment. A new approach for the choice of purification technology ». *Proceedings Earthcare*, p. 3.
- Heerhartz, Sarah, Megan Dethier, Jason Toft, Jeffery Cordell et Andrea Ogston. 2014. « Effects of Shoreline Armoring on Beach Wrack Subsidies to the Nearshore Ecotone in an Estuarine Fjord ». *Estuaries and Coasts*, vol. 37, n° 5, p. 1256-1268.
- Hill, Heather W., Joseph T. Kelley, Daniel F. Belknap et Stephen M. Dickson. 2004. « The effects of storms and storm-generated currents on sand beaches in Southern Maine, USA ». *Marine Geology*, vol. 210, n° 1, p. 149-168.
- Holthuijsen, Leo H. 2007. *Waves in oceanic and coastal waters* (2007). Cambridge: Cambridge University Press, 387 p.
- Jacob, Johann Lucas, Moktar Lamar et Arnaud Sawadogo. 2015. « Adaptation aux changements climatiques et indicateurs de suivi dans le contexte des zones côtières ». In *Adaptation aux changements climatiques en zones côtières : politiques publiques et indicateurs de suivi des progrès dans sept pays occidentaux*. p. 434. Presses de l'Université du Québec.
- Johnston, A., P. Slovinsky et K. L. Yates. 2014. « Assessing the vulnerability of coastal infrastructure to sea level rise using multi-criteria analysis in Scarborough, Maine (USA) ». *Ocean and Coastal Management*, vol. 95, p. 176-188.
- Jolicoeur, Serge, et Stéphane O'Carroll. 2007. « Sandy barriers, climate change and long-term planning of strategic coastal infrastructures, Îles-de-la-Madeleine, Gulf of St. Lawrence (Québec, Canada) ». *Landscape and Urban Planning*, vol. 81, n° 4, p. 287-298.
- Kasinatha Pandian, P., S. Ramesh, M.V. Ramana Murphy, S. Ramachandran et S. Thayumanavan. 2004. « Shoreline Changes and near Shore Processes along Ennore Coast, East Coast of South India ». *Journal of Coastal Research*, vol. 20, n° 3, p. 828-845.

- Kelley, Sean W., John S. Ramsey et Mark R. Byrnes. 2004. « Evaluating Shoreline Response to Offshore Sand Mining for Beach Nourishment ». *Journal of Coastal Research*, vol. 20, n° 1, p. 89-100.
- Kim, Young C. 2010. *Handbook of coastal and ocean engineering* (2010). Hackensack, N.J.: World Scientific, 1163 p.
- Kraus, Nicholas C. 1988. « The Effects of Seawalls on the Beach: An Extended Literature Review ». *Journal of Coastal Research*, p. 1-28.
- Kraus, Nicholas C., et William G. McDougal. 1996. « The Effects of Seawalls on the Beach: Part I, An Updated Literature Review ». *Journal of Coastal Research*, vol. 12, n° 3, p. 691-701.
- Lagueux, France, et Hugues Côté. 1995. « Guide pour les notaires ayant une transaction avec le ministère des ressources naturelles ». [http://www.mrc-lacsaintjean.qc.ca/media/cms/doccenters\\_mod/7/guide\\_notaire.pdf](http://www.mrc-lacsaintjean.qc.ca/media/cms/doccenters_mod/7/guide_notaire.pdf). Consulté le 15 février 2016.
- Leclerc, Anne-Marie. 2010. « Ouvrages de protection du littoral effets sur la morphologie des plages et sur les communautés benthiques intertidales, région de Saint-Siméon et de Bonaventure, Baie des Chaleurs (Québec, Canada) ». Rimouski, Québec, Université du Québec à Rimouski.
- Leewis, Lies, Peter M. van Bodegom, Jelte Rozema et Gerard M. Janssen. 2012. « Does beach nourishment have long-term effects on intertidal macroinvertebrate species abundance? ». *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 113, p. 172-181.
- Manson, G.K. 2005. « On the coastal populations of Canada and the world ». In *Proceedings of the 12<sup>th</sup> Canadian Coastal Conference*. (Darmouth (NS), 6-9 novembre), p. 11.
- Martins, Gustavo M., André F. Amaral, Francisco M. Wallenstein et Ana I. Neto. 2009. « Influence of a breakwater on nearby rocky intertidal community structure ». *Marine Environmental Research*, vol. 67, n° 4, p. 237-245.
- Maystre, Lucien Yves, Jacques Pictet et Jean Simos. 1994. *Méthodes multicritères ELECTRE*. Coll. « Gérer l'environnement ». Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes, 300 p.
- McCormick, Michael E. 2010. *Ocean engineering mechanics with applications* (2010). New York: Cambridge University Press, 580 p.



- Morneau, François, Hugues Côté, Fabien Lecours, Michel Michaud, Christian Poirier et Denis Roy. 2001. *Étude d'impact sur l'environnement : Projets de protection des berges de la route 132 autour de la péninsule gaspésiennes*. Gouvernement du Québec, ministère des Transports du Québec, 84 p.
- Moschella, P. S., M. Abbiati, P. Åberg, L. Airoidi, J. M. Anderson, F. Bacchiocchi, F. Bulleri, G. E. Dinesen, M. Frost, E. Gacia, L. Granhag, P. R. Jonsson, M. P. Satta, A. Sundelöf, R. C. Thompson et S. J. Hawkins. 2005. « Low-crested coastal defence structures as artificial habitats for marine life: Using ecological criteria in design ». *Coastal Engineering*, vol. 52, n° 10, p. 1053-1071.
- Neumeier, Urs, Benoit Ruest, Adrien Lambert, Eliott Bismuth, Dany Dumont, Denis Jacob, Jean-Pierre Savard et Sylvain Joly. 2013. *Modélisation du régime des vagues du golfe et de l'estuaire du Saint-Laurent pour l'adaptation des infrastructures côtières aux changements climatiques*. UQAR ISMER, 253 p.
- Ounnar, Fouzia, Selma Khader, Yves Dubromelle, Jean-Pierre Prunaret et Patrick Pujo. 2013. « Évaluation d'une méthode d'ordonnement multicritère utilisant AHP ». In *10<sup>e</sup> Congrès international de génie industriel*. (La Rochelle, France), p. 7.
- Pilkey, Orrin H., William J. Neal, Joseph T. Kelley et J. Andrew G. Cooper. 2011. *The world's beaches* (2011). Coll. « World's beaches : a global guide to the science of the shoreline ». Berkeley: University of California Press, 283 p.
- Ranasinghe, Roshanka, et Ian L. Turner. 2006. « Shoreline response to submerged structures: A review ». *Coastal Engineering*, vol. 53, n° 1, p. 65-79.
- Roche. 2011. *Analyse des solutions en érosion cotière dans la Baie de Plaisance, Îles-de-la-Madeleine*. 100 p.
- Ruest, Benoit (98). 2014. *Utilisation d'un modèle paramétrique pour l'évaluation du climat de vagues de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent et son évolution future dans un contexte de changements climatiques* (2014). Rimouski, Québec: Université du Québec à Rimouski.
- Sánchez-Badorrey, E., M. A. Losada et J. Rodero. 2008. « Sediment transport patterns in front of reflective structures under wind wave-dominated conditions ». *Coastal Engineering*, vol. 55, n° 7, p. 685-700.
- Savard, Jean-Pierre, Pascal Bernatchez, François Morneau, François Saucier, Philippe Gauchon, Simon Senneville, Christian Fraser et Yvan Jolivet. 2008. *Étude de la sensibilité des côtes et de la vulnérabilité des communautés du golfe du Saint-Laurent aux impacts des changements climatiques - Synthèse des résultats*. Bibliothèque nationale du Québec, 48 p.

- Savard, Jean-Pierre, et Alain Bourque. 2010. « Adapter les zones côtières aux changements climatiques: de la consultation à l'action ». *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 14, n° 2, p. 219-232.
- Schärling, Alain. 1996. *Pratiquer Electre et Prométhée*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes, 177 p.
- Schlacher, Thomas A., Rocio Noriega, Alan Jones et Theresa Dye. 2012. « The effects of beach nourishment on benthic invertebrates in eastern Australia: Impacts and variable recovery ». *Science of the Total Environment*, vol. 435-436, p. 411-417.
- SDAGE. 2005. *Guide technique n°9, Connaissance et gestion de l'érosion du littoral*. 51 p.
- Senneville, Simon, Simon St-Onge-Drouin, Dany Dumont, Anne-Claire Bihan-Poudec, Zakaria Belemaalem, Maude Corriveau, Pascal Bernatchez, Simon Bélanger, Simon Tolszczuk-Leclerc et Rémy Villeneuve. 2014. *Modélisation des glaces dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent dans la perspective des changements climatiques*. 384 p.
- Seymour, Richard J., Nancy E Bockstael, Thomas J. Campbell, Robert G. Dean, Paul D. Komar, Orrin H. Pilkey, Anthony P. Pratt, Martin R. Snow, Robert F. Van Dolah, J. Richard Weggel et Robert L. Wiegel. 1995. *Beach Nourishment and Protection* (1995). National Academy Press.
- Sumer, B. Mutlu, Richard J. S. Whitehouse et Alf Tørum. 2001. « Scour around coastal structures: a summary of recent research ». *Coastal Engineering*, vol. 44, n° 2, p. 153-190.
- Sverdrup, H.U., et W.H. Munk. 1947. *Wind, sea, and swell : Theory of relations for forecasting*.
- Tompkins, Emma L., Roger Few et Katrina Brown. 2008. « Scenario-based stakeholder engagement: Incorporating stakeholders preferences into coastal planning for climate change ». *Journal of Environmental Management*, vol. 88, n° 4, p. 1580-1592.
- Vaidya, A. M., Santosh K. Kori et M. D. Kudale. 2015. « Shoreline Response to Coastal Structures ». *Aquatic Procedia*, vol. 4, p. 333-340.
- Vaidya, Omkarprasad S., et Sushil Kumar. 2006. « Analytic hierarchy process: An overview of application ». *European Journal of Operational Research*, vol. 169, p. 29.
- Van Der Wal, Daphne. 2004. « Beach-Dune Interactions in Nourishment Areas along the Dutch Coast ». *Journal of Coastal Research*, vol. 20, n° 1, p. 317-325.
- Van Rijn, L. C. 2011. « Coastal erosion and control ». *Ocean & Coastal Management*, vol. 54, n° 12, p. 867-887.

- Vaselli, Stefano, Fabio Bulleri et Lisandro Benedetti-Cecchi. 2008. « Hard coastal-defence structures as habitats for native and exotic rocky-bottom species ». *Marine Environmental Research*, vol. 66, n° 4, p. 395-403.
- Wong, Poh Poh, Inigo J. Losada, Jean-Pierre Gattuso, Jochen Hinkel, Abdellatif Khattabi, Kathleen L. McInnes, Yoshiki Saito et Asbury Sallenger. 2014. *Coastal systems and low-lying areas*. Coll. « Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability ». Cambridge, United Kingdom, 361-409 p.
- Zanuttigh, Barbara, Luca Martinelli, Alberto Lamberti, Paula Moschella, Stephen Hawkins, Silva Marzetti et Victor Ugo Ceccherelli. 2005. « Environmental design of coastal defence in Lido di Dante, Italy ». *Coastal Engineering*, vol. 52, n° 10, p. 1089-1125.
- Zoppi, Corrado. 2007. « A multicriteria-contingent valuation analysis concerning a coastal area of Sardinia, Italy ». *Land Use Policy*, vol. 24, n° 2, p. 322-337.

